

doi:10.3969/j.issn.1001-4616.2024.04.002

多目标约束下的数字标牌优化选址

——以北京市六环路以内区域为例

毛珩懿¹, 王雨雪², 张珣^{1,3}, 张鑫¹

(1.北京工商大学计算机与人工智能学院, 食品安全大数据技术北京市重点实验室, 北京 100048)

(2.中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100193)

(3.新疆和田学院, 新疆 和田 848000)

[摘要] 针对数字标牌优化选址研究欠缺考虑人文地理环境、布设成本和用户需求等约束, 将数字标牌影响因子数据多尺度空间化, 统一多源数据的空间基准, 构造数字标牌优化选址的多源影响因子和多尺度建模因子序列. 在此基础上构建数字标牌多重约束最大覆盖模型, 并采用改进的遗传算法求解模型, 提出优化选址方案. 以北京市六环路以内区域为例, 对选址结果空间分布进行分析与总结. 以覆盖情况和运行时间作为评价指标, 由所提方法得到的最大受众覆盖率约为 0.93, 最大覆盖受众数量为 185 051. 结果表明该模型能有效耦合多源异构数据优化选址, 算法效果在多个指标下优于传统遗传算法和 Gurobi 软件, 有效提升了数字标牌投放的精准性及效率, 为实际公共基础设施布局优化提供了参考.

[关键词] 数字标牌, 广告投放, 最大覆盖模型, 优化选址, 遗传算法

[中图分类号] TP301 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2024)04-0011-10

Optimal Location of Digital Signage Under Multi-Objective Constraints: a Case Study of the Area Within the Sixth Ring Road of Beijing

Mao Hengyi¹, Wang Yuxue², Zhang Xun^{1,3}, Zhang Xin¹

(1.School of Computer and Artificial Intelligence, Beijing Technology and Business University,

Beijing Key Laboratory of Big Data Technology for Food Safety, Beijing 100048, China)

(2.College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

(3.Xinjiang Hetian College, Hotan 848000, China)

Abstract: The research on the optimal location of digital signage lacks consideration of constraints related to human geography, deployment costs, and user needs. This paper spatializes the factors influencing digital signage across multiple scales, unifies spatial references of multi-source data, and constructs a sequence of multi-source influencing factors and multi-scale modeling factors for the optimal location of digital signage. Based on this, a multi-constraint maximum coverage model for digital signage is constructed, and an improved genetic algorithm is used to solve the model and to propose optimal location schemes. Taking the area within the sixth ring road of Beijing as an example, the spatial distribution of optimal location is analyzed and summarized. Coverage and runtime are used as evaluation indicators, the maximum audience coverage rate is approximately 0.93 and the maximum coverage number is 185 051 by the proposed method. The results indicate that the model effectively couples multi-source heterogeneous data to optimal location, the algorithm outperforms traditional genetic algorithms and Gurobi software across multiple indicators, and the accuracy and efficiency of digital signage deployment are effectively improved, which provides a reference for the optimal layout of practical public infrastructure.

Key words: digital signage, advertising placement, maximum coverage model, optimal location, genetic algorithm

数字标牌(digital signage, DS)是通过大屏幕终端显示设备,在公共场所发布商业、娱乐和财经等信息的多媒体视听系统^[1-2].不同于传统的电视或报纸广告,数字标牌能够提供个性化、定制化的广告投放,不

收稿日期:2024-05-27.

基金项目:国家自然科学基金项目(42101470)、北京市社会科学基金项目(24YTC038).

通讯作者:张珣,博士,教授,博士生导师,研究方向:地理人工智能. E-mail:zhangxun@btbu.edu.cn

仅在增强品牌曝光方面表现出色,还在提升客户互动体验和广告投效益等方面展现了显著优势^[3-6].随着数字标牌的广泛应用及其市场的快速扩展,大量数字标牌缺乏科学规划和合理布局,未能得到充分和有效的利用.目前针对数字标牌的研究主要关注通过技术手段提升受众体验^[7]、信息传递效率^[8]、位置推荐^[9]等,科学地进行数字标牌空间分布优化和合理选址布局,成为行业亟需解决的重要问题.

数字标牌的优化选址属于商业点状物优化问题.优化问题涉及资源配置、服务水平等,需要结合具体研究目标进行空间决策优化,以获得符合需求的选址结果^[10].目前点状物优化选址多用基于数学模型的空间优化方法、启发式及元启发式法、机器学习法.其中,机器学习^[11-12]由于其在空间优化选址中强大的数据处理和预测能力,近年来被运用于选址研究中,但由于其“黑箱”性质^[13],其在商业决策过程中缺乏一定透明度及可解释性.基于数学模型的空间优化方法计算精度较高,但仅适用于数据及规模较小的选址问题.例如,北极地区的救援需求和设施分布相对稀疏,Shan 等^[14]采用区位覆盖集模型、双重覆盖位置模型及 P 中值模型构建数学模型,实现了北极地区救援基地的最佳分配.然而,随着数据量的增加和问题复杂度的提升,传统数学模型的求解时间会显著增加,甚至难以在合理时间内得出解.而启发式及元启发式法^[15]在问题规模较大或结构复杂的情况下,能够提供近似最优解.栾兆亮等^[16]构建多目标地铁线路规划模型,提出基于空间启发式算法的地铁线路智能规划方法,对地铁线路站点分布进行了高效规划.遗传算法作为一种模拟生物进化过程的启发式算法,由于其自适应性、无需依赖先验知识和全局优化能力,被广泛应用于多个领域并取得显著成果^[17-19],但在面对复杂的 NP-Hard 问题时,遗传算法仍存在早熟收敛、局部搜索能力不足等问题.

为更有效地应对现有研究中选址方法在处理大规模和复杂问题时的局限性,本文考虑了多种数字标牌的影响因子,统一数据尺度并进行相关性分析,构建了最大覆盖模型.为克服传统遗传算法的不足,本文通过引入自适应概率动态调整选择、交叉和变异,解决了固定概率导致的局部收敛和搜索效率低的问题,并优化了交叉率和变异率,减少了早熟收敛风险.此外,将最大覆盖模型的目标函数直接用于适应度评估,其效果在多个指标下优于传统遗传算法和 Gurobi 软件,有效提升了数字标牌投放的精准性及效率,为实际公共基础设施布局优化提供了参考.

1 数字标牌影响因子序列构建

1.1 数据描述

研究中所使用的数据包括数字标牌基础数据及影响因子数据.数字标牌基础数据包含北京市六环路以内区域的数字标牌唯一标识、屏幕尺寸、播放价格、点位地址信息等属性.数字标牌产业作为现代商业的组成部分,其应用效果受到社交要素、交通要素、商业要素等商业活动要素的影响^[9].而人口、交通、商业环境及商业网点签到数据是影响数字标牌布局与选址的主要因子.因此,本文选取如表 1 所示的指标作为数字标牌影响因子数据.

1.2 数据多尺度空间化

鉴于数字标牌影响因子数据的多源异构特性,对数字标牌基础数据及其影响因子数据进行空间化处理.研究采用点、面插值法以实现多源异构数据在统一空间尺度上的表达和建模.首先以数字标牌为中心创建一定半径的空间缓冲区,用以定义每个数字标牌的影响范围.然后,将多源异构数据映射到所创建的缓冲区内,并采用空间查询技术提取在每个缓冲区内与数字标牌相关的点数据.通过这种方式,将各类数据在相同的空间框架下进行表示与分析,确保不同来源数据能够在统一的空间尺度上进行融合与处理.最后,将生成的空间化数据转换为统一的影响因子序列,用于进一步的模型构建与优化分析.

考虑到空间数据的多粒度和多尺度特性,以及其属性数据间关系的变化性^[20-21],针对可塑性面积单元问题(modifiable areal unit problem, MAUP)^[22],现有研究常通过建立不同尺度的缓冲区进行比较分析,以寻找合适的划分尺度^[23-27].而缓冲区的尺度设定需考虑算法精度、数字标牌的可达性及各影响因子的

表 1 数据描述

Table 1 Data description

数据类型	名称	来源
商业要素	房价数据	链家
	商业网点	北京市 2013 年经济普查
	大众点评数据	大众点评
交通要素	出租车轨迹数据	T-Drive 轨迹数据
	路网中心性数据	OpenStreetMap
社交媒体	微博签到数据	新浪微博
人口	人口普查数据	北京市第七次全国人口普查
数字标牌	数字标牌基础数据	项目组积累

作用范围. 借鉴前人研究^[28-29], 本文设定缓冲区尺度为 50~200 m、步长为 50 m.

考虑到数据量纲和数量级的多样性, 首先对数字标牌影响因子数据进行删除异常值和填补缺失值的预处理, 以提高模型的准确性. 然后, 将修正后的数据进行投影转换, 并通过空间连接操作与 2013 年开展的第三次全国经济普查时收集的北京市建筑物数据相结合, 实现数据的空间化. 最后, 将经过空间化及异常值处理后的数字标牌区位因子作为样本点的属性数据, 组成样本点, 形成数字标牌影响因子空间数据, 如下式所示:

$$x_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}\}, i = 1, \dots, n, \quad (1)$$

式中, n 表示缓冲区的个数, m 表示数字标牌影响因子的个数.

从而得到样本点矩阵:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中, x_{nm} 表示第 n 个缓冲区的第 m 个数字标牌影响因子.

通过最小值-最大值规范化处理方法对原始的样本点资料数据进行统一处理, 如下式所示:

$$x^* = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad (3)$$

式中, x^* 为归一化处理后的数字标牌影响因子数据, x 为原始数字标牌影响因子数据, x_{\max} 为全部区位样本点中影响因子的最大值, x_{\min} 为全部区位样本点中影响因子的最小值. 归一化处理后的数字标牌影响因子数据最后分别于 50~200 m 缓冲区进行插值分析, 使所有数据都能在统一的尺度上进行可视化及建模, 完成数字标牌影响因子的空间化, 并得到数字标牌多尺度建模因子序列.

1.3 数据相关性分析

本文通过计算及分析数字标牌数据与各影响因子间的相关性, 保留与数字标牌分布相关性较强的影响因子, 为构建优化选址模型简化因子选择.

由于研究数据不符合正态分布, 采用斯皮尔曼秩相关系数进行数据的相关性分析. 分析结果如图 1 所示, 与数字标牌布设强相关的因子有出租车轨迹数据、大众点评数据和微博签到数据. 大众点评数据在反映商业活跃度上更为有效, 替代了人口数量和商业网点数目. 出租车轨迹数据比路网中心性数据更能精确反映人流密集区的交通情况. 微博签到数据则能够捕捉人群聚集和活动频率, 为广告投放热点区域的选定提供有力依据. 因此, 选定这 3 种数据作为数字标牌布设的主要影响因子, 用于构建优化选址模型.

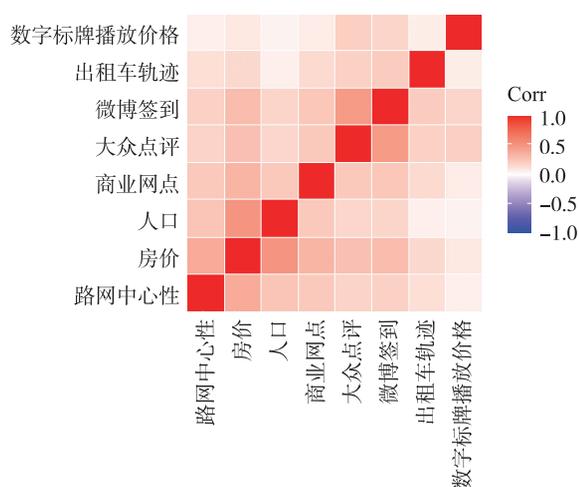


图 1 数字标牌影响因子相关性分析热力图

Fig. 1 Digital signage impact factor correlation analysis heat map

2 选址模型构建

2.1 数字标牌最大覆盖模型构建

为最大化北京市六环路以内区域有限数字标牌的服务辐射能力, 以增加广告效益, 模型以最大化覆盖受众数量为目标函数. 首先, 通过分析微博签到、出租车轨迹及大众点评等数据在数字标牌多尺度缓冲区的特征, 识别影响因子间显著的数量级差异. 其次, 采用自然间断点法对数字标牌多尺度建模因子序列划分 0 至 4 五个级别, 得出每一级别的分级数据. 最后, 依据各类影响因子的分级数据, 以数字标牌布设成本、数字标牌布设数量、缓冲区内出租车轨迹与缓冲区交集的样本数量、微博签到及大众点评数据数量为约束条件, 完成数字标牌最大覆盖模型的构建.

目标函数旨在最大化覆盖研究区内受众, 定义如下所示:

$$\text{Maximize } F(x) = \sum_{i=1}^n v_i x_i. \tag{4}$$

约束函数为:

$$s_i > 1, \tag{5}$$

$$h_i > 1, \tag{6}$$

$$t_i > 1, \tag{7}$$

$$\sum_{i=1}^n x_i = p, \tag{8}$$

$$\sum_{i=1}^n c_i \times x_i < C. \tag{9}$$

$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 表示 n 块数字标牌位置的决策二进制变量集合, 其中 $i \in [1, n]$, x_i 表示第 i 块数字标牌的位置是否被选择, 如果数字标牌被选择, 则 $x_i = 1$, 否则 $x_i = 0$.

$V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, 其中 v_i 表示第 i 块数字标牌在 50~200 m 范围内覆盖的受众的数量.

$S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, 其中 s_i 表示第 i 块数字标牌在 50~200 m 范围内覆盖的大众点评数据的分级数.

$H = \{h_1, h_2, \dots, h_n\}$, 其中 h_i 表示第 i 块数字标牌在 50~200 m 范围内覆盖的微博签到数据的分级数.

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$, 其中 t_i 表示第 i 块数字标牌在 50~200 m 范围内覆盖的出租车轨迹数据的分级数.

式(5)定义了第 i 块数字标牌缓冲区的大众点评分级数应大于 1. 式(6)定义了第 i 块数字标牌缓冲区的微博签到分级数应大于 1. 式(7)定义了第 i 块数字标牌缓冲区的出租车轨迹分级数应大于 1. 式(8)设置数字标牌总数等于 p . 式(9)表示布设数字标牌的总成本应小于 C , 其中 c_i 表示第 i 块数字标牌的价格.

以数字标牌为核心构建缓冲区, 以 200 m 缓冲区为例, 自然间断点法分级结果与数字标牌缓冲区数量如表 2 所示.

表 2 数字标牌影响因子分级结果
Table 2 Digital signage impact factor rating results

级别	200 m 缓冲区内样本点数量/个			缓冲区数量/个		
	大众点评数据	出租车轨迹数据	微博签到数据	大众点评数据	出租车轨迹数据	微博签到数据
0	0~83	0~1 516	0~31	779	765	774
1	84~202	1 517~3 870	32~71	788	781	767
2	203~387	3 871~7 174	72~121	762	759	781
3	388~730	7 175~12 083	122~202	749	759	761
4	731~1 142	12 084~25 961	203~351	745	759	740

2.2 改进的遗传算法设计

数据量的增加导致优化模型变得复杂, 因此求解数字标牌最大覆盖选址模型成为了 NP-Hard 问题. 传统数学模型无法求解 NP-Hard 优化问题, 因此需引入遗传算法求解. 改进的遗传算法流程如图 2 所示. 首先, 将每一个解作为染色体进行编码. 其次, 初始化种群信息, 修改适应性函数为数字标牌最大覆盖模型的目标函数. 最后, 依据数字标牌最大覆盖模型的约束函数执行遗传算子选择、交叉、突变过程. 其中, 改进的算法将传统的人工设定选择、交叉及突变概率修改为依据约束条件对染色体进行排序. 将符合约束条件的染色体按覆盖数量排序, 自适应地选择符合条件的染色体, 通过多次迭代得到稳定的优化选址结果.

2.2.1 染色体编码

在改进的遗传算法中, 针对最优化问题的候选解以字符串形式编码为染色体. 数字标牌最大覆盖模型的候选解是从 m 个设施的集合中选择 k 个设施的位置组合, 定义为位置集合 $L = \{l_1, l_2, \dots, l_m\}$. 因此, 此处染色体编码为整数字符串 $\{t_1, t_2, \dots, t_k\}$, 表示被选中的 k 个设施的索引. 每个元素表示为 $l_i \in L, i = 1, 2, \dots, k$, 其中, k 个设施的潜在位置仅限于设施本身的位置. 例如, 如果 $m = 100$ 且 $k = 5$, 则染色体 $\{2, 34, 75, 87, 92\}$ 表示根据模型要求选择 $l_2, l_{34}, l_{75}, l_{87}$ 和 l_{92} 的设施作为潜在位置, 编码在染色体上.

2.2.2 种群初始化

初始种群由用户自定义的 P 条染色体组成, 称为种群大小. 初始种群的每个染色体从 $\{1, 2, \dots, m\}$ 集合中选择位置. 结合研究区域数字标牌数量, 此处将 P 分别设为 10、50、100、200、300、...、2 500, 进行对比

实验,对比不同 P 值下,数字标牌覆盖受众的情况.

2.2.3 适应度函数计算

设置遗传算法的适应度函数为模型目标函数,即最大覆盖受众.在迭代过程中,计算不同染色体的适应度值,并根据这些值对染色体进行排序,确保遗传算法能够更好地适应数字标牌最大覆盖模型的求解问题.

2.2.4 遗传算子

遗传算法包含选择、交叉和突变 3 个核心算子,用于从当前种群中创造出下一代种群.交叉率和变异率的选择通常是基于实际情况和经验,但过高的交叉率和变异率会导致个体适应度较大波动,而过低的交叉率和变异率又会导致搜索过程缓慢且可能过早收敛.因此,本文采用改进的自适应交叉算子和变异算子来平衡两者之间关系,如下所示:

$$P_c = \begin{cases} P_{c1} - \frac{(P_{c1} - P_{c2})(f' - f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}}, & f' \geq f_{avg} \\ P_{c1}, & f' < f_{avg} \end{cases} \quad (10)$$

$$P_m = \begin{cases} P_{m1} - \frac{(P_{m1} - P_{m2})(f - f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}}, & f \geq f_{avg} \\ P_{m1}, & f < f_{avg} \end{cases} \quad (11)$$

式中, P_c 表示交叉率, P_{c1} 为交叉操作的初始概率, P_{c2} 为交叉率的下限值; P_m 表示突变率, P_{m1} 为突变操作的初始概率, P_{m2} 为突变率的下限值; f_{max} 是当前群体中个体的最大适应度函数值; f_{avg} 是当前群体的平均适应度函数值; f' 是两个交叉个体中较大的适应度值; f 是当前个体的适应度值.从式(10)和式(11)可以看出,当 f 或 f' 小于 f_{avg} 时,交叉率和突变率接近于其最大值,从而提高遗传算法的搜索能力;当遗传算法处于后期且 f 或 f' 大于 f_{avg} 时,交叉率和突变率通过自适应调整逐渐降低,以确保遗传算法具有更好的适应性和全局收敛性.

3 实验结果与分析

3.1 研究区概况

北京是中国的政治、文化、科技创新、国际交流中心,同时也是全球数字标牌产业聚集的重要城市之一,北京市六环路以内区域覆盖了北京市 85% 的数字标牌.查阅北京市第七次全国人口普查公报可知,北京市六环路以内区域作为中心城区和部分近郊区域的主要覆盖范围,集中了较大比重的常住人口^[30].综合以上区域特点,本文选取北京市六环路以内区域作为研究区.

3.2 改进的遗传算法求解数字标牌最大覆盖模型

为避免因缓冲区尺度过大而消除相关地理信息,以数字标牌 50~200 m 多尺度建模因子序列为输入,并基于研究区数字标牌数量,将 P 设为 10、50、100、200、300、...、2 500,进行多组对比实验.

当 P 值从 10 增加到 2 500 时,50~200 m 数字标牌缓冲区下的覆盖数量对比如图 3 所示.随着缓冲区尺度的增加,数字标牌覆盖受众的数量逐渐增加,当数字标牌缓冲区为 200 m 时,覆盖数量相对较高.

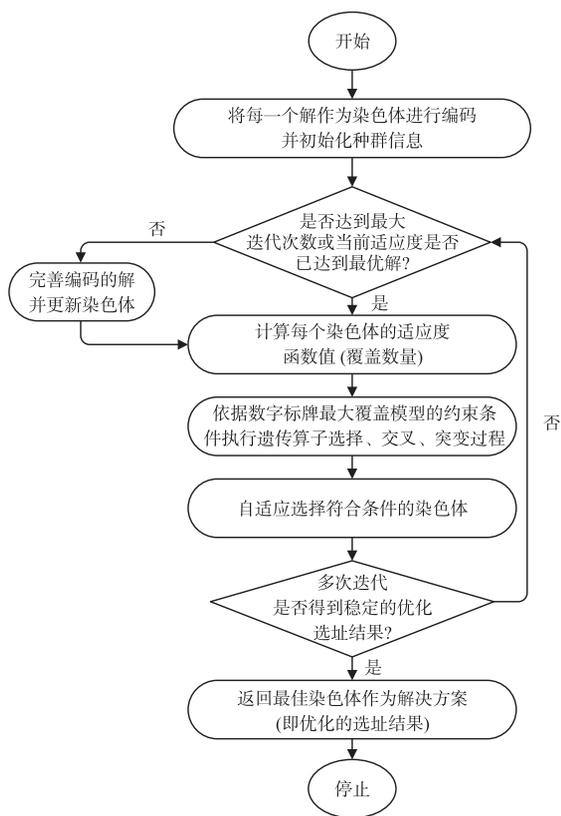


图 2 改进的遗传算法流程图

Fig. 2 Flowchart of the improved genetic algorithm

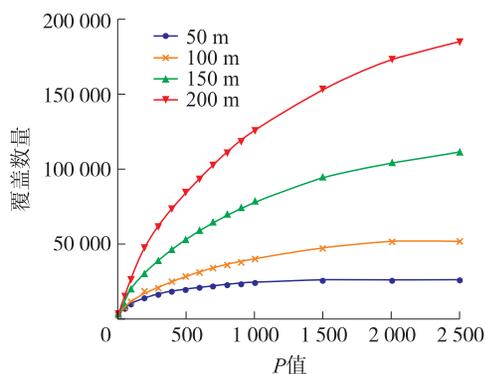


图 3 50~200 m 数字标牌缓冲区下的覆盖数量对比

Fig. 3 Comparison of coverage number under 50~200 m digital signage buffer

因此,将数字标牌缓冲区尺度设为 200 m, P 设为 10、50、100、200、300、...、2 500, 进行多组对比实验. 改进的遗传算法的迭代图如图 4 所示. 随着迭代次数增加, 数字标牌覆盖受众数量首先经历一个快速上升阶段, 随后增长速度显著减缓, 曲线迅速趋于平稳. 曲线趋于平缓, 表明算法已达到最优解^[31]. 当 P 值为 2 500 时, 算法已趋于收敛, 表明结果已接近最优解, 继续增加迭代次数不再能显著增加覆盖受众数

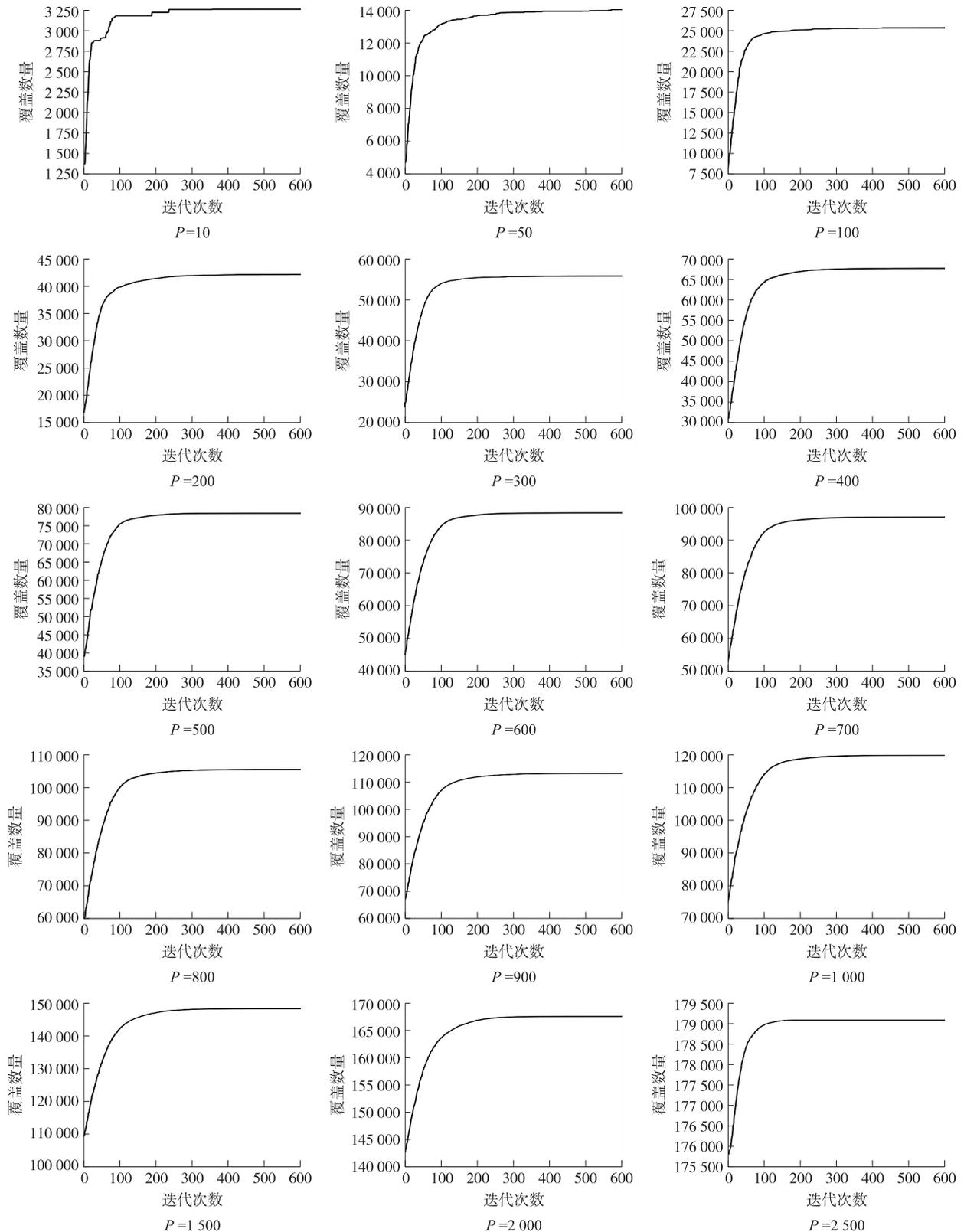


图 4 200 m 数字标牌缓冲区下改进的遗传算法迭代图

Fig. 4 Iteration diagram of the improved genetic algorithm under a 200 m digital signage buffer

量,额外的计算成本也无法带来相应的性能提升。

表3详细给出了缓冲区尺度为200 m时改进的遗传算法迭代结果, P 表示种群规模。从表3可以看出,随着 P 值增加,数字标牌覆盖受众的覆盖率和覆盖数量逐渐递增。当 P 值为2 500时,最大覆盖率约为0.93,超过了0.90,最大覆盖受众数量为185 051。证明了本文提出的数字标牌最大覆盖模型的正确性与考虑布设数量、布设成本等约束的优化选址模型的有效性。

表3 200 m数字标牌缓冲区下改进的遗传算法迭代结果

Table 3 Iteration results of the improved genetic algorithm under a 200 m digital signage buffer

P 值	覆盖率	覆盖数量	P 值	覆盖率	覆盖数量	P 值	覆盖率	覆盖数量
10	0.019 259	3 849	400	0.367 526	73 465	900	0.593 521	118 640
50	0.072 967	14 585	500	0.421 059	84 166	1 000	0.628 350	125 602
100	0.129 278	25 841	600	0.469 965	93 942	1 500	0.769 846	153 886
200	0.239 922	47 958	700	0.515 070	102 958	2 000	0.867 198	173 346
300	0.308 004	61 567	800	0.556 006	111 141	2 500	0.925 754	185 051

3.3 模型有效性验证

以覆盖情况和算法运行时间为评价指标,将改进的遗传算法与已有的遗传算法和Gurobi软件求解结果进行对比,结果如表4所示。

表4 200 m数字标牌缓冲区下的求解结果对比

Table 4 Comparison of solution results under a 200 m digital signage buffer

求解方法	覆盖数量	覆盖率	运行时间/s
改进的遗传算法	185 051	0.925 754 229	39 300.924 93
遗传算法	179 055	0.895 754 229	16 816.138 61
Gurobi	158 759	0.794 219 908	0.391 59

使用改进的遗传算法求解数字标牌最大覆盖模型,其数字标牌覆盖率约为0.93,最大受众覆盖数量为185 051,与已有的遗传算法和Gurobi两种方法相比,其覆盖率和最大覆盖受众数量均相对较高,说明了方法的正确性和有效性均相对较高,但时效性较差。

3.4 优化选址结果

基于数字标牌最大覆盖模型的数字标牌优化选址结果如图5所示。从图5可以看出,当布设的数字标牌数量为10个,即当 P 值为10时,考虑布设成本、布设数量等约束,数字标牌最大覆盖优化选址结果主要分布于北京站、三里屯、798艺术园区等地周边。

当 P 值为500时,优化选址结果主要分布于中关村、奥林匹克公园、三里屯、北京站等地的周边,这些地区分布大量商业中心与大型商场,人流量大。此外,数字标牌推荐投放地点在良乡公园、大兴滨河森林公园等地的周边也有零星分布。

随着 P 值增加至2 500时,优化选址结果总体呈现大杂小聚的分布态势,主要集中分布于北京市地铁四环内及五环的环路周边,零星分布于交通便利的交通枢纽,北部区域的数字标牌选址结果分布密度高于南部区域,东部区域和西部区域选址结果分布密度相当,但东部区域聚集现象更为显著。数字标牌选址优化结果显示了北京市商业发展、人口密度的空间偏向性,集中分布的地区建筑密度高、人口流量大、经济发达、交通便利,涵盖医院、商业中心、学校、政府办公等职能聚集场所。

4 结论

本文提出了一种基于数字标牌多尺度影响因子序列、考虑多重约束的数字标牌最大覆盖优化选址模型,并对北京市六环路以内区域的数字标牌的空間分布情况、覆盖数量、覆盖率及求解时间进行多方面验证,结果表明提出的方法能够科学有效地提高数字标牌广告投放的覆盖情况。主要结论如下:

(1)对多源异构的影响因子进行50~200 m范围内的多尺度空间化,统一空间基准,在此基础上构建了数字标牌多尺度建模因子序列,结果表明耦合多源异构数据能有效地提高数字标牌布设的科学性。

(2)构建了多重约束数字标牌最大覆盖模型,当投放数量 P 为2 500时,最大覆盖受众数量为185 051,验证了模型在提升广告投放效益方面的有效性。

(3)改进的遗传算法的适应性函数和交叉遗传算子,提升了全局收敛性及适应性.当投放数量 P 为 2 500 时,数字标牌的最大覆盖率约为 0.93,算法的覆盖效率得到了有效提高.

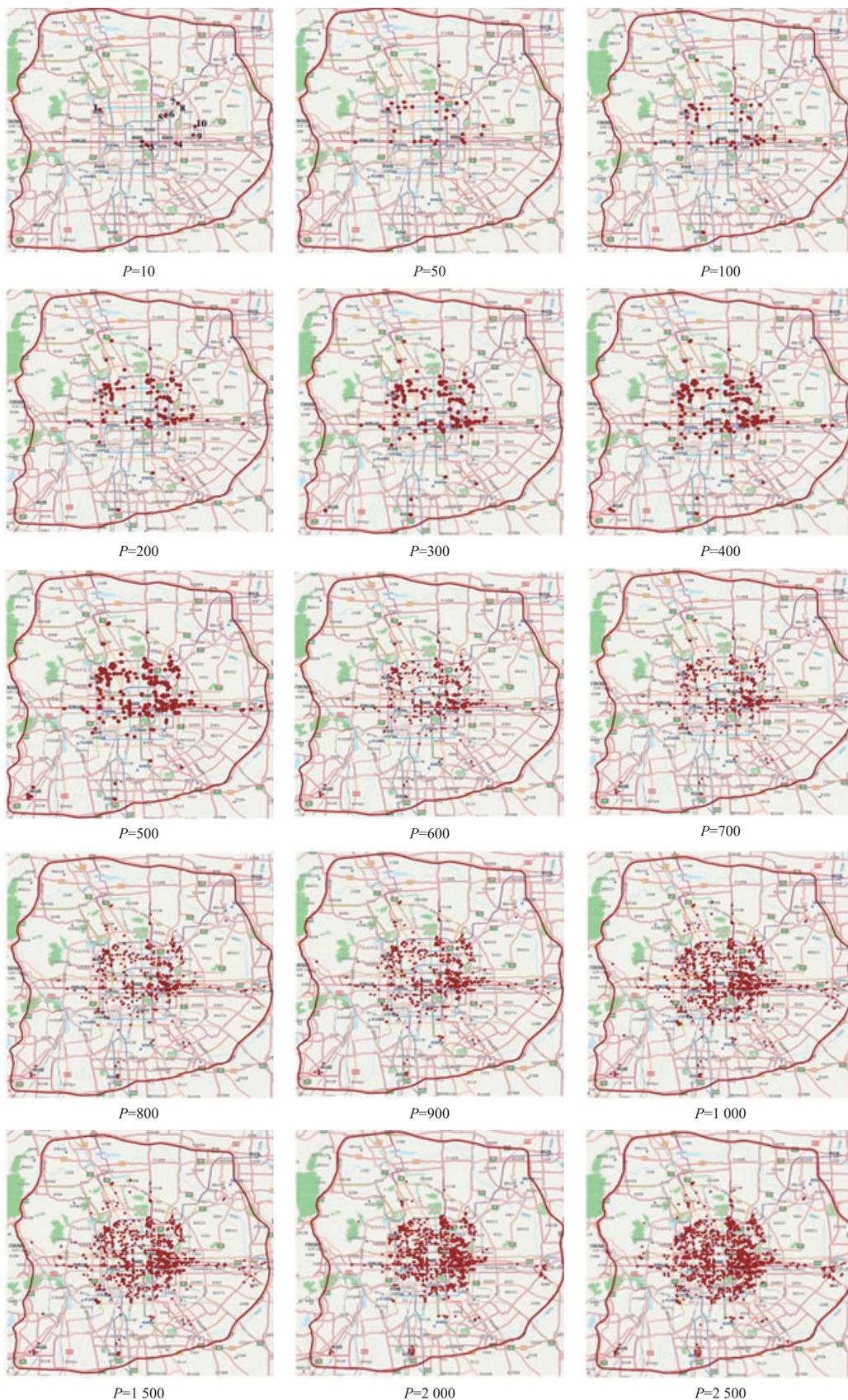


图 5 数字标牌优化选址结果

Fig. 5 Optimal location results of digital signage

[参考文献]

- [1] HOSSAIN M A, ISLAM A, LE N T, et al. Performance analysis of smart digital signage system based on software-defined IoT and invisible image sensor communication[J]. *International journal of distributed sensor networks*, 2016, 12(7):1-14.
- [2] DAVIES N, CLINCH S, ALT F. Pervasive displays: understanding the future of digital signage[J]. *Synthesis lectures on mobile & pervasive computing*, 2014, 8(1):1-128.
- [3] XIE X, ZHANG X, FU J, et al. Location recommendation of digital signage based on multi-source information fusion[J]. *Sustainability*, 2018, 10(7):2357.
- [4] BAUER C, GARAUS M, STRAUSS C, et al. Research directions for digital signage systems in retail[J]. *Procedia computer science*, 2018, 141:503-506.
- [5] WILLIS K, AURIGI A. *Digital and smart cities*[M]. London:Routledge, 2017:64-85.
- [6] 郑杰. A公司数字标牌产品市场营销策略研究[D]. 昆明:云南大学, 2014.
- [7] IJAZ M F, TAO W, RHEE J, et al. Efficient digital signage-based online store layout:an experimental study[J]. *Sustainability*, 2016, 8(6):511.
- [8] SHEPPARD D, FELKER N, SCHMALZEL J. Development of voice commands in digital signage for improved indoor navigation using Google Assistant SDK[C]//2019 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS). Sophia Antipolis, France:IEEE, 2019:1-5.
- [9] ZHANG X, MA G, JIANG L, et al. Analysis of spatial characteristics of digital signage in Beijing with multi-source data[J]. *ISPRS international journal of geo-information*, 2019, 8(5):207.
- [10] 蒲金芳, 刘沙沙, 温良友, 等. 江南丘陵区农村居民点多功能空间特征与分区优化[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2023, 59(2):271-280.
- [11] 王中, 曹凯. 耦合改进图注意力网络与深度强化学习的公共服务设施智能化选址方法[J]. *地球信息科学学报*, 2024, 26(11):2452-2464.
- [12] 周林锦, 杨君子, 孙朝云, 等. 基于深度学习的宏观风资源评估与风电场选址[J]. *农业与技术*, 2024, 44(6):86-90.
- [13] MINH D, WANG H X, Li Y F, et al. Explainable artificial intelligence: a comprehensive review[J]. *Artificial intelligence review*, 2022, 55(5):3503-3568.
- [14] SHAN Y, ZHANG R. Study on the allocation of a rescue base in the Arctic[J]. *Symmetry*, 2019, 11(9):1073.
- [15] 王万良, 徐昶, 赵燕伟, 等. 基于超启发式算法的选址-路径问题研究[J]. *浙江工业大学学报*, 2019, 47(6):604-610.
- [16] 栾兆亮, 涂伟, 沈少青, 等. 基于空间启发式的城市地铁线路选址优化方法[J]. *地理与地理信息科学*, 2019, 35(4):64-69.
- [17] WANG X, LIU Z, Li X. Optimal delivery route planning for a fleet of heterogeneous drones: a rescheduling-based genetic algorithm approach[J]. *Computers & industrial engineering*, 2023, 179:109179.
- [18] ALHIJAWI B, AWAJAN A. Genetic algorithms: theory, genetic operators, solutions, and applications [J]. *Evolutionary intelligence*, 2024, 17:1245-1256.
- [19] GEN M, LIN L. *Genetic algorithms and their applications* [M]//Springer Handbook of Engineering Statistics. London: Springer, 2023:635-674.
- [20] ZHANG X, YAO J, SILA-NOWICKA K, et al. Geographic concentration of industries in Jiangsu, China: a spatial point pattern analysis using micro-geographic data[J]. *The annals of regional science*, 2021, 66(2):439-461.
- [21] CHE L, WANG H Q, FEI T, et al. Kriging interpolation method optimized by multi-scale least squares support vector machine[J]. *Geo-information science*, 2017, 19(8):1001-1010.
- [22] KWAN M. The uncertain geographic context problem[J]. *Annals of the association of American geographers*, 2012, 102(5):958-968.
- [23] 左岍, 周勇, 李晴, 等. 基于最优尺度的鄂西南山区景观生态风险时空变化特征[J]. *生态学杂志*, 2023, 42(5):1186-1196.
- [24] HOUSTON D. Implications of the modifiable areal unit problem for assessing built environment correlates of moderate and vigorous physical activity[J]. *Applied geography*, 2014, 50:40-47.
- [25] 陈得心. 考虑可塑性面积单元问题的出租车出行需求影响因素研究[D]. 成都:西南交通大学, 2021.
- [26] CROSS P C, CAILLAUD D, HEISEY D M. Underestimating the effects of spatial heterogeneity due to individual movement and spatial scale: infectious disease as an example[J]. *Landscape ecology*, 2013, 28(2):247-257.

- [27] SIVAKUMAR A, BHAT C R. Comprehensive, unified framework for analyzing spatial location choice[J]. Transportation research record, 2007, 2003(1):103-111.
- [28] YU B, WANG Z, MU H, et al. Identification of urban functional regions based on floating car track data and POI data[J]. Sustainability, 2019, 11(23):6541.
- [29] QIAN J, LIU Z, DU Y, et al. Quantify city-level dynamic functions across China using social media and POIs data[J]. Computers, environment and urban systems, 2021, 85:101552.
- [30] 北京市统计局,北京市第七次全国人口普查领导小组办公室. 北京市第七次全国人口普查公报(第三号)[N]. 北京日报, 2021-05-20(004).
- [31] LONDE M A, PESSOA L S, ANDRADE C E, et al. Biased random-key genetic algorithms: a review[J]. European journal of operational research, 2025, 321(1):1-22.

[责任编辑:丁 蓉]