

“移动救护车”需求预测分析及运营模式探讨 ——以网约车为例

谢晓敏, 陈欣池, 李 婷, 任思妮

湖南人文科技学院数学与数据科学学院, 湖南 娄底

收稿日期: 2026年9月26日; 录用日期: 2026年10月19日; 发布日期: 2026年10月28日

摘 要

为探究网约车“移动救护车”适配性运营模式, 优化中小城市非紧急就医出行运力配置, 本文以娄底市为研究区域, 选取2020~2024年各区县GDP与常住人口数据, 采用极差标准化与熵权法构建需求强度指数, 量化区域就医出行需求差异; 基于GM(1, 1)灰色模型开展2025~2026年需求趋势预测, 通过后验差比、小误差概率检验模型精度, 并采用留一交叉法验证预测可靠性; 依托静态需求分级结果与动态增长预测数据, 分层设计适配高、中、低需求区县的差异化空间运营方案, 结合通勤双峰出行规律搭建分时运力调度模式, 配套司机激励、服务标准化等长效运营保障机制。结果表明: 娄星区为高需求核心区, 新化县、涟源市、双峰县为中需求区, 冷水江市为低需求区; GM(1, 1)灰色模型对娄星区、双峰县、新化县、涟源市预测精度达一级, 冷水江市为二级。研究形成需求量化、趋势预判与运营落地的完整分析体系, 可为娄底市网约车“移动救护车”分区域、分时段运力调度与可持续运营模式落地提供量化数据支撑与实操决策参考。

关键词

熵权法, 网约车需求量, 灰色预测模型

Demand Forecast Analysis and Operational Model Exploration of “Mobile Ambulances” —A Case Study of Ride-Hailing Services

Xiaomin Xie, Xinchu Chen, Ting Li, Sini Ren

School of Mathematics and Data Science, Hunan University of Humanities, Science and Technology, Loudi
Hunan

Received: September 26, 2026; accepted: October 19, 2026; published: October 28, 2026

文章引用: 谢晓敏, 陈欣池, 李婷, 任思妮. “移动救护车”需求预测分析及运营模式探讨[J]. 应用数学进展, 2026, 15(10): 305-319. DOI: 10.12677/aam.2026.1510416

Abstract

To explore the operational model of ride-hailing services as “mobile ambulances” and to optimize the allocation of transportation capacity for non-emergency medical travel in small and medium-sized cities, this study takes Loudi City as the research area, selects GDP and resident population data from various districts and counties spanning the period 2020~2024, employs extreme value normalization combined with the entropy weight method to construct a demand intensity index to quantify regional disparities in medical travel demand; utilizes the grey prediction GM (1, 1) model to forecast demand trends for the period 2025~2026, evaluates the model’s accuracy using the posterior difference ratio and small-error probability tests, and validates the predictive reliability through the leave-one-out cross-validation method; based on the static demand classification results and dynamic growth forecast data, this study designs differentiated spatial operational schemes tailored for high-, medium-, and low-demand districts and counties; it further establishes a time-based capacity dispatching model by incorporating the dual-peaked commuting pattern, along with long-term operational support mechanisms such as driver incentives and service standardization. The results indicate that Louxing District is the high-demand core zone, Xinhua County, Lianyuan City, and Shuangfeng County are medium-demand zones, while Lengshuijiang City is the low-demand zone; the GM (1, 1) model achieved first-level prediction accuracy for Louxing District, Shuangfeng County, Xinhua County, and Lianyuan City, and second-level accuracy for Lengshuijiang City. This study has established a comprehensive analytical framework encompassing demand quantification, trend forecasting, and operational implementation, providing quantitative data support and practical decision-making references for the regional and temporal allocation of ride-hailing “mobile ambulance” capacity and the implementation of sustainable operational models in Loudi City.

Keywords

Entropy Weight Method, Online Ride-Hailing Demand, Grey Prediction Model

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

网约车需求预测作为智能交通系统的核心组成部分，受到来自国内外学者的广泛关注。朱明明、王金城对网约车需求量的影响因素进行了相关性分析，根据网约车需求的时空特征设计了短时需求预测模型[1][2]。王璐瑶[3]基于网约车轨迹数据，建立群智运输理念下的网约车运输网络模型。利用蚁群算法求解，并得到最优路径。缪格[4]等综合考虑了车辆等待时间成本、行驶距离成本、收益、容量约束以及时间窗约束，构建了网约车合乘路径优化模型。在出行热点区域研究方面，学者们利用数理统计、DBSCAN等聚类、数据可视化等方法，找到并识别出交通流量较大的区域。武书羽等[5]使用 k -距离的改进 DBSCAN 空间聚类算法对热点区具体所在位置进行细化研究。在网约车需求预测方面，深度学习已被应用于智能交通领域的多种问题中，包括人群异常检测、对象检测和需求检测。陈志举[6]等分析了不同的时空模式在需求大小、位置和时间上的差异，探讨了网约车出行在不同区域的功能类型。蔡建湖等[7]考虑碳排放成本，构建以网约车利润最大、乘客与司机的等待时间总和最小的双目标优化模型。白竹等[8]提出一种改进图卷积神经网络(GCN)的网约车需求预测模型，并证明了该模型的可行性和有效性。陈茜[9]研究网

约车调度系统智能路径匹配调度算法,并提出了一种灰色模型与蚁群算法结合的算法,用来求解最优参考路径问题。

国外研究方面,随着“互联网+”的时代到来,智能手机成了人人标配,动态拼车服务成了可能,尤其在欧洲、北美等国家有所体现。例如,Shared Transport 是 Avego 公司提供的拼车服务[10]。共享交通工具主要依靠匹配行程相同的乘客和私家车司机,把私家车纳入公共交通。德国也提供了拼车出行平台,其拼车服务覆盖率范围最大。有专门的第三方机构对该平台惊醒维护,在驾驶员和乘客之间搭起了沟通的桥梁。Syed A A 等研究了一种基于平衡区域的分配方法,该方法平衡了短期批量和长期的利润和,该方法使用纽约市(NYC)出租车数据并进行了模拟测试,结果表明该方法显著减少了长期供需不平衡,减少了明确重新定位车辆的需要。

综合上述国内外相关研究成果可见,现有网约车需求预测与出行优化领域已形成较为完善的理论体系,但仍存在三处明显研究缺口。其一,现有研究多聚焦城市普通通勤、日常网约车出行,专门针对非紧急就医出行细分场景的量化评估与预测研究较为稀缺,鲜有文献结合地区经济、人口双维度构建适配医疗出行的需求评价指标体系,缺少面向就医出行的区域热度分级量化方法。其二,现有预测模型多采用蚁群优化等复杂算法,对长时序、大样本轨迹数据依赖度高,区县尺度仅 5 年短样本的就医需求序列难以适配;虽已有文献引入灰色模型,但仍缺少指标量化、模型建模、精度交叉验证的完整实证链条。其三,现有研究多停留在需求数值预测层面,缺乏面向“移动救护车”这类医疗专属网约车服务的分区域、分时段差异化运力调度配套策略。基于上述现有研究的局限,本文以娄底市为实证载体,融合熵权综合评价与 GM(1,1)灰色预测模型,构建适配中小城市区县尺度的非紧急就医出行需求分析框架,补齐细分医疗出行场景的量化预测空白,并依托测算结果提出可落地的网约车“移动救护车”运营优化方案。

本文开展了以下研究工作:

1) 选取 GDP、常住人口作为就医出行核心驱动指标,采用极差标准化消除量纲差异,依托熵权法实现指标客观赋权,线性加权合成年度需求强度指数;依据城市通勤规律拆分早晚高峰、平峰分时需求,结合空间可视化划分全市高、中、低三级就医出行热点区域,完成娄底各区县静态需求空间格局量化识别。

2) 以测算得到的 2020~2024 年区县需求指数为原始序列,构建 GM(1,1)灰色预测模型完成 2025~2026 年需求外推;通过后验差比、小误差概率双重指标检验模型拟合精度,并采用留一交叉回测法验证预测可靠性,结合各区县增长特征研判未来需求演化规律;依托静态需求分级与时序预测结果,分高、中、低需求区域搭建分层空间运营方案,匹配早晚双峰出行规律设计分时运力调度机制,配套司机激励、标准化服务等保障体系,形成适配娄底本地的网约车“移动救护车”完整运营模式。

2. 模型建立

2.1. 基于熵权法的需求强度评估

1) 极差标准化法

为讨论娄底市各县市区城市网约车出行需求强度,本文主要统计了娄底市各县市区的不同指标:经济生产总值(万元)、常住人口数(万人)。由于各指标数量级差异极大,因此无法直接加权。本文将通过极差变换将所有指标压缩至[0,1]区间,并保留数据相对差异。

假设原始指标矩阵为 X_{ij} , i 为区县, j 为年份,则正向指标全局极差标准化为:

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

其中, $X_{\min} = \min(X_{ij})$ 表示全局最小值, $X_{\max} = \max(X_{ij})$ 是全局最大值。 X'_{ij} 为标准化后的指标值。为避免分母为零的特殊情况, 引入极小正数 ε , 修正后的标准化公式为:

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min} + \varepsilon} \quad (2)$$

经此变换, 所有指标的数值均被映射至同一无量纲尺度, 使得后续跨指标加权具备数学上的可比性与合理性。

2) 指标权重设定

为避免主观赋权带来的偏差, 采用熵权法对 GDP 和人口进行客观赋权, 其基本原理是: 指标的离散程度越大, 其信息熵越小, 提供的信息量越大, 权重越高。计算步骤如下:

为构造概率分布, 计算第 j 项指标下第 i 个区县的比重:

$$p_{ij} = \frac{X'_{ij}}{\sum_{i=1}^n X'_{ij}} \quad (3)$$

其中, $p_{ij} \in [0,1]$, 且 $\sum_{i=1}^m p_{ij} = 1$ 。该比重反映了该区县在该年份的指标值占全部时空样本总值的比例。

计算第 j 项指标的熵值:

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad (4)$$

其中, $\frac{1}{\ln n}$ 为调节系数, 其作用是保证 $e_j \in [0,1]$ 。当 P_{ij} 取值完全均匀时, 熵值 e_j 趋近于 1, 表示该指标几乎不提供有效信息; 反之, 若取值高度集中, 则熵值趋近于 0, 表示该指标具有强区分力。

计算第 j 项指标的权重:

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^m (1 - e_j)} \quad (5)$$

其中, m 为指标总数。显然, $w_j \in [0,1]$ 且 $\sum_{j=1}^m w_j = 1$ 。经过上述步骤, GDP 权重 w_1 与人口权重 w_2 将完全由数据自身的分布特征驱动, 从而确保评估结果的客观性与可复现性。

3) 需求强度指数计算

基于标准化后的指标值 x'_{ij} 与熵权法得出的权重 w_j , 采用线性加权法合成各区县各年度的综合需求强度指数 I_i :

$$I_i = \sum_{j=1}^n w_j \cdot x'_{ij} \quad (6)$$

其中, i 为区县标识, 该指数 I_i 是一个介于 0 到 1 之间的相对无量纲数, 其数值高低直接反映了该区县的就医出行需求强度相对于其他区县的强弱程度。

4) 时段结构拆分

城市居民的就医出行行为并非在日内均匀分布, 而是与通勤、工作等日常活动高度耦合, 呈现明显的时段集聚特征。为精确刻画不同时段的差异化需求水平, 为平台提供分时运力配置的量化依据, 本研究将上述年度综合指数 I_i 进一步拆分为早高峰、晚高峰及平峰三个时段的子指数。

设早高峰时段(例如 7:00~9:00)的需求占比为 α ，晚高峰时段(例如 17:00~19:00)的需求占比为 β ，其余平峰时段的需求占比为 γ ，且满足 $\alpha + \beta + \gamma = 1$ ， $\alpha, \beta, \gamma \in (0, 1)$ 。则各区县在早高峰时段的需求强度指数 $I_i^{\text{早高峰}}$ 、晚高峰时段需求强度指数 $I_i^{\text{晚高峰}}$ 以及平峰时段需求强度指数 $I_i^{\text{平峰}}$ 分别计算如下：

$$I_i^{\text{早高峰}} = \alpha \cdot I_i \quad (7)$$

$$I_i^{\text{晚高峰}} = \beta \cdot I_i \quad (8)$$

$$I_i^{\text{平峰}} = \gamma \cdot I_i \quad (9)$$

其中，参数 α 、 β 、 γ 的具体取值需依据研究区域的实际交通出行调查数据或参照同类城市经验值予以标定，本文将在第 3 章数值实验中结合娄底市实际情况赋予具体数值。

2.2. 基于灰色预测模型的需求趋势预测

为预测 2025~2026 年各区县需求强度指数趋势，本文基于 2020~2024 年的需求指数建立灰色预测模型 GM(1, 1)。

假设原始数据序列为：

$$x^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)) \quad (10)$$

其中 n 为年份数量(本文 $n = 5$ ，2020~2024 年)。

因为原始数据随机混乱，直接建模趋势杂乱，所以首先进行一次累加生成(1-AGO)，将原始数据转化为单调递增、近似指数规律的光滑序列，满足微分方程建模前提。对原始序列进行一次累加生成(1-AGO)，得到新序列：

$$x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i), \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

建立灰色微分方程

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b \quad (12)$$

其中， a 为发展系数，决定系统发展趋势快慢； b 为灰色作用量，代表系统外部驱动常量，反映数据整体偏移水平。式(12)是灰色预测模型的核心方程，把原始增量、背景值建立线性关系，是后续最小二乘法求参的基础。

$z^{(1)}(k)$ 为背景值，通常取相邻两个累加值的均值，是搭建离散灰微方程，求解参数 a 、 b 的中间过渡变量：

$$z^{(1)}(k) = 0.5x^{(1)}(k) + 0.5x^{(1)}(k-1), \quad k = 2, 3, \dots, n \quad (13)$$

接下来进行参数估计。记待估参数向量为 $\hat{u} = (a, b)^T$ ，采用最小二乘法估计：

$$\hat{u} = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (14)$$

其中：

$$B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix}, \quad Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix} \quad (15)$$

$\hat{u}$ 是最小二乘最优解, 保证所有方程残差平方和最小, 得到最优 a, b 。其中, B 为自变量设计矩阵, 由背景值构造; Y 为因变量向量, 原始序列去掉第一个值。

建立预测方程。时间响应式为:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right) e^{-ak} + \frac{b}{a}, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (16)$$

将得到的 a, b 代入微分方程通解, 再离散化为上述时间响应式, $\hat{x}^{(1)}$ 代表累加序列预测值, 输入序号 k , 即可算出未来任意时刻一次累加序列的预测结果。

最后, 将预测的累加值还原为原始序列的预测值:

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) \quad (17)$$

由于得到的 $\hat{x}^{(1)}$ 为累加序列, 不是需要的原始实际数据, 需要进行累加的逆运算, 把累加预测结果还原回原始量纲、原始波动形式 $\hat{x}^{(0)}$ 即原始序列预测值, 用于拟合检验, 未来外推预测。

2.3. 模型精度检验

判断模型拟合优劣, 验证建模有效性, GM (1, 1)算出预测值后, 不能直接默认预测可靠, 必须对比原始真实数据与模型拟合值的偏差大小, 量化模型误差, 判断本文建立的灰色预测模型能不能反映序列真实变化规律。判断模型是否具备外推预测能力, 建立后验差比和小误差概率检验模型, 只有精度达标 (一级/二级合格), 才可以用该模型对未来期数做外延预测; 如果精度勉强/不合格, 说明原始数据不适合灰色预测模型, 需要更换模型、预处理数据。

采用后验差比 C 和小误差概率 P 检验模型精度:

$$C = \frac{S_2}{S_1} \quad (18)$$

其中, S_1 为原始序列标准差, S_2 为残差序列标准差, C 为误差波动与原始数据总波动的比值, C 越小, 拟合效果越好, 反之, 拟合差。

计算小误差概率:

$$p = P\{e(k) - \bar{e} < 0.6745S_1\} \quad (19)$$

其中 $e(k)$ 表示第 k 个样本的残差, $\bar{e}$ 表示残差序列均值。

小误差概率 P 用于表征单个样本点出现小幅拟合残差的频次占比, 反映模型逐点拟合的稳定性水平。选取正态分布下约 50% 的数据落在均值 ± 0.6745 倍标准差区间内。选取原始序列 S_1 参与构造, 能够与后验差比 C 共用同一基准量 S_1 , 使 p 和 C 构成逻辑自洽、相互配套的双指标模型精度检验体系。

统计绝大多数残差偏离均值的幅度是否落在合理区间: p 越大, 代表绝大多数单点残差都很小, 模拟单点拟合稳定性越好; p 越小, 说明多样本残差偏大, 模型局部拟合失控。

下表体现了双向约束判定, 必须同时满足对应等级的 p 和 C 的要求, 才归入该精度等级。

由表 1 结果可知, 一、二级代表模型有效, 可开展未来趋势预测; 三级代表模型可粗略参考, 建议优化原始数据、滑动 GM 建模等; 四级代表放弃该灰色预测模型, 更换其他预测算法。

Table 1. Standard classification of precision levels

表 1. 精度等级标准划分

精度等级	P	C
一级(好)	0.95	<0.35

续表

二级(合格)	0.80	<0.50
三级(勉强)	0.70	<0.65
四级(不合格)	≤0.70	≥0.65

3. 数值实验

为了验证第 2 章所建模型的有效性，并揭示娄底市各区县非紧急就医出行需求强度的分布规律与未来趋势，本章设计了两组数值实验。

3.1. 基于熵权法的需求强度评估实验

为评估娄底市各区县非紧急就医出行需求强度，从《娄底市统计年鉴》[11]中提取娄底市五区县(娄星区、双峰县、新化县、冷水江市、涟源市)2020~2024 年 GDP(见表 2)和常住人口(见表 3)，采用极差标准化消除量纲影响，运用熵权法客观确定指标权重，计算各区县年度需求强度指数，并识别出行热点区域。

Table 2. Gross domestic product (in ten thousand yuan) of each county and district in Loudi city

表 2. 娄底市各县市区经济生产总值(万元)

	2024	2023	2022	2021	2020
娄星区	7,844,844	7,278,511	6,975,937	6,519,575	5,857,953
双峰县	3,322,337	2,966,066	2,916,102	2,770,695	2,660,030
新化县	3,763,137	3,419,283	3,267,572	3,098,138	2,869,461
冷水江市	2,556,104	2,678,586	2,647,920	2,572,662	2,382,743
涟源市	3,829,844	3,562,521	3,487,455	3,296,571	3,029,166

Table 3. Number of permanent residents in each county and district of Loudi city (in ten thousand)

表 3. 娄底市各县市区常住人口数(万人)

	2024	2023	2022	2021	2020
娄星区	76.39	75.56	75.43	75.32	75.253
双峰县	66.78	67.14	67.36	68.11	68.5917
新化县	114.23	115.02	116.17	118.03	119.6538
冷水江市	32.36	32.59	32.71	32.76	32.9912
涟源市	83.01	84.01	84.3	86.15	86.2099

基于 2024 年截面数据，首先，利用公式(3)计算各指标下各区县样本的占比。以 GDP 指标为例，2024 年娄星区 GDP 为 784.48 亿元，占 25 个样本 GDP 总和的 6.42%，其比重为 0.0642；而 2020 年冷水江市 GDP 为 238.27 亿元，仅占总和的 1.95%，其比重为 0.0195。类似地计算所有样本的比重后，代入公式(4)，即先对每个比重取自然对数并乘以其自身，按样本累加求和，再乘以调节系数 $1/\ln 25 \approx 0.3107$ ，计算得到 GDP 指标的熵值 $e_1 = 0.9004$ ，人口指标的熵值 $e_2 = 0.9478$ 。GDP 的熵值小于人口的熵值，说明 GDP 指标在 25 个时空样本中的离散程度更大、信息量更丰富，对需求强度的区分能力更强。最后，根据公式(5)将

各指标的差异系数 $1-e_j$ 进行归一化处理, 即 $w_j=(1-e_j)/\sum(1-e_k)$ 。由 $1-e_1=0.0996$ 、 $1-e_2=0.0522$, 计算得到 GDP 权重 $w_1=0.0996/(0.0996+0.0522)=0.6562$, 人口权重 $w_2=0.0522/(0.0996+0.0522)=0.3438$, 两者之和为 1。该结果表明, GDP 权重显著高于人口权重, 说明经济水平差异是解释各区县就医出行需求分布的主要因素。

在确定 GDP 权重 $w_1=0.6562$ 和人口权重 $w_2=0.3438$ 后, 根据公式(6)对标准化后的指标值进行线性加权求和, 即 $D_{it}=w_1 \cdot \text{GDP}'_{it}+w_2 \cdot \text{POP}'_{it}$, 计算得到 2020~2024 年各区县综合需求强度指数如表 4 所示。

Table 4. Demand intensity index for all districts and counties in Loudi city, 2020~2024
表 4. 2020~2024 年娄底市各区县需求强度指数

年份	娄星区	双峰县	新化县	涟源市
2020	0.586	0.176	0.402	0.290
2021	0.666	0.187	0.423	0.322
2022	0.721	0.202	0.436	0.337
2023	0.758	0.207	0.450	0.345
2024	0.830	0.248	0.488	0.373

本文年均增长率采用复合年均增长率(Compound Annual Growth Rate, CAGR), 计算公式为 $\text{CAGR}=(\text{期末值}/\text{期初值})^{1/n}-1$, 其中 n 为时间间隔年数。据此计算, 娄星区需求指数从 2020 年的 0.586 增长至 2024 年的 0.830, 年均增长 9.1%, 位居首位。作为娄底市中心城区, 娄星区 GDP 最高(2024 年 784 亿元), 人口密集(76.39 万人), 经济集聚效应持续增强, 就医出行需求增长最快。双峰县从 0.176 增长至 0.248, 年均增长 9.0%, 增速最快但绝对值仍处于低位, 该县经济体量较小(2024 年 GDP 332 亿元), 但近年来 GDP 增速较快(2020~2024 年增长 24.9%), 带动就医需求同步提升。涟源市从 0.290 增长至 0.373, 年均增长 6.5%, 排名第三, 其 GDP 和人口均居中等水平, 需求稳步增长。新化县从 0.402 增长至 0.488, 年均增长 5.0%, 排名第二, 该县人口最多(114.23 万人), 庞大的人口基数支撑了较高的就医出行需求。冷水江市需求指数在 2020~2023 年从 0.002 增长至 0.036, 2024 年回落至 0.021, 排名末位, 该市人口最少(32.36 万人)、GDP 最低(256 亿元), 且近年来人口持续外流、经济增速放缓, 导致就医出行需求低迷, 2020~2024 年复合增长趋势不具参考意义, 本文不纳入年均增长对比。

进一步根据公式(7)~(9), 设早高峰占比 $\alpha=0.35$ 、晚高峰占比 $\beta=0.35$ 、平峰占比 $\gamma=0.30$, 将 2024 年各区县年度综合指数拆分为三个时段, 结果如表 5 所示。

Table 5. 2024 district/county demand intensity index by time periods
表 5. 2024 年各区县分时段需求强度指数

区县	早高峰(35%)	晚高峰(35%)	平峰(30%)
娄星区	0.290	0.290	0.249
双峰县	0.087	0.087	0.074
新化县	0.171	0.171	0.146
冷水江市	0.007	0.007	0.006
涟源市	0.131	0.131	0.112

为了更直观地对比 2024 年娄底市各区县各时段就医出行需求分布情况，绘制图 1 如下。

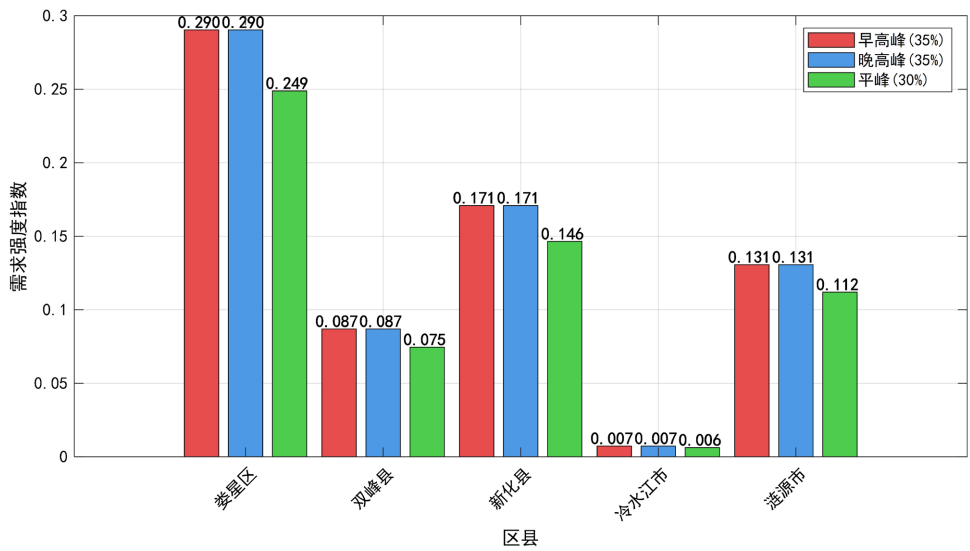


Figure 1. Distribution of healthcare travel demand across different periods in 2024
图 1. 2024 年各时段就医出行需求分布

结合表 5 与图 1 可知，娄星区在早晚高峰时段的需求强度均为 0.290，远高于其他区县；新化县早晚高峰需求为 0.171，居第二位；涟源市为 0.131，双峰县为 0.087，冷水江市仅为 0.007。早晚高峰合计占比达 70%，与通勤出行规律高度一致，表明非紧急就医出行(如上班前取药、下班后就诊)与日常通勤行为密切相关。因此，网约车平台应在早晚高峰时段于娄星区、新化县等热点区域重点部署运力，以满足集中爆发的就医出行需求。

根据 2024 年需求强度指数，生成热点分布图，如图 2。

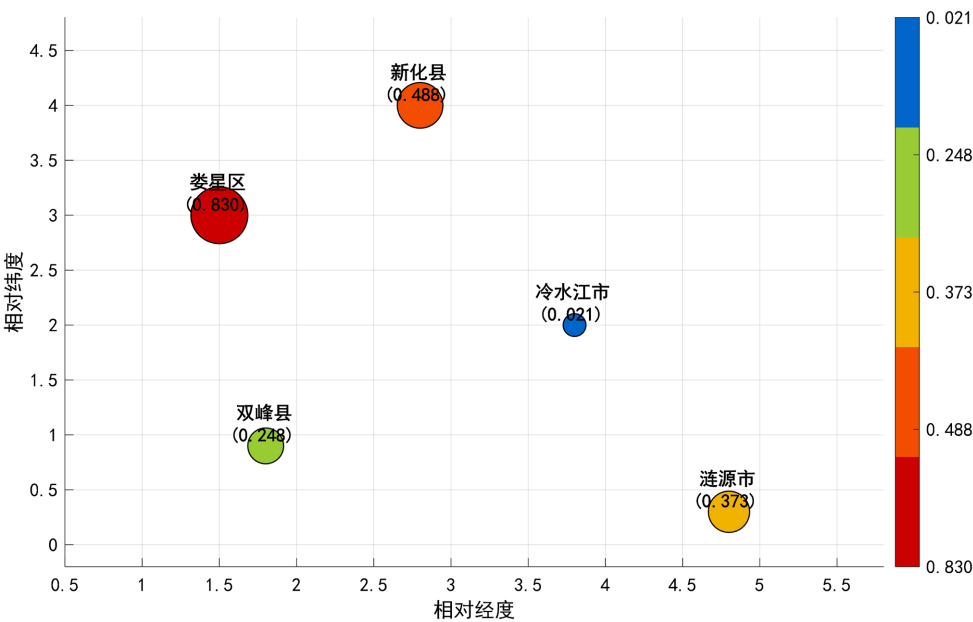


Figure 2. 2024 distribution map of hotspots for medical travel needs in Loudi city
图 2. 2024 年娄底市就医出行需求热点分布图

利用 2024 年需求强度指数计算需求占比。先对五个区县 2024 年的需求强度指数求和，得到全市需求总量，再用各区县指数除以该总量即得各自占比。以娄星区为例，2024 年需求强度指数为 0.830，全市五个区县需求强度指数之和为 $0.830 + 0.248 + 0.488 + 0.021 + 0.373 = 1.960$ ，故娄星区占比为 $0.830/1.960 \times 100\% \approx 42.35\%$ 。同理计算其他区县，可得：娄星区约 42%、新化县约 25%、涟源市约 19%、双峰县约 13%、冷水江市约 1%。结合需求强度指数数值，可将各区县划分为三个需求等级：高热点区(指数 ≥ 0.50)为娄星区(0.830)；中热点区($0.20 \leq$ 指数 < 0.50)包括新化县(0.488)、涟源市(0.373)、双峰县(0.248)；低热点区(指数 < 0.20)为冷水江市(0.021)。热点分布与各区县的经济、人口排名高度一致：娄星区 GDP 最高、新化县人口最多，两者需求最高；冷水江市两项指标均最低，需求最低。这验证了本实验评估方法的合理性，即 GDP 和人口能够有效解释就医出行需求的区域差异。

3.2. 基于灰色预测模型的出行需求预测分析

为得到 2025~2026 年娄底市各区县需求强度指数，本文使用灰色预测模型 GM (1, 1) 基于 2020~2024 年需求强度指数(表 4)对其进行趋势预测，并采用留一法回测验证模型精度。

3.2.1. 模型参数与精度估计

由表 4 数据，对每个区县的需求强度指数序列建立 GM (1, 1) 模型，基于式(14)和(15)的推导，得到发展系数 a 和灰色作用量 b ，通过式(18)，进一步计算得到后验差比 C 和小误差概率 P ，检验该模型精度等级，各区县 GM (1, 1) 模型参数及精度检验结果如表 6 所示：

Table 6. Parameter values and accuracy of the GM (1, 1) model for each district/county
表 6. 各区县 GM (1, 1) 模型参数与精度

区县	发展系数 a	灰色作用量 b	后验差比 C	小误差概率 P	精度等级
娄星区	-0.0714	0.6005	0.0688	1.0000	一级(好)
双峰县	-0.0912	0.1586	0.2773	1.0000	一级(好)
新化县	-0.0470	0.3893	0.1957	1.0000	一级(好)
冷水江市	+0.0179	0.0296	0.4603	1.0000	二级(合格)
涟源市	-0.0471	0.2991	0.1363	1.0000	一级(好)

发展系数 $a < 0$ 表示序列呈增长趋势，绝对值越大增长越快； $a > 0$ 表示呈下降趋势，由表 6 数据可得：娄星区、双峰县、新化县、涟源市的发展系数均为负值(-0.0714, -0.0912, -0.0470, -0.0471)，表明这些区域的需求强度指数呈稳定增长趋势，与经济发展和人口结构变化一致。双峰县增长最快($a = -0.0912$)，与其近年来 GDP 增速较快(2020~2024 年增长 24.9%)相符；冷水江市发展系数为正(+0.0179)，表明需求强度指数呈下降趋势，与该区域人口持续外流(2020~2024 年人口从 32.99 万降至 32.36 万)、经济增速放缓的实际情况相符。

灰色作用量 b 值越大，代表区域就医出行需求的基础驱动势能越强、初始需求基数越高、外部发展支撑条件越优越。结合表 6 参数可知，各区县灰色作用量数值呈现明显的层级分化，与区域需求强度的现实格局高度契合。娄星区 b 值为 0.6005，为全市最高，凸显其作为中心城区，依托完善的医疗配套、密集的人口分布、发达的经济体系，具备极强的就医出行需求原生驱动力，外部环境对需求增长的正向助推作用最为显著。新化县 b 值为 0.3893，位居第二，得益于其全市最大的常住人口基数，人口就医刚需形成了稳定的需求驱动基础，外部环境对需求的支撑力度充足。涟源市 b 值为 0.2991，处于中等水平，

其经济、人口规模均处于全市中位，外部驱动因素平稳，需求增长的基础势能适中。双峰县 b 值为 0.1586，驱动势能相对偏弱，对应其经济体量较小、区域资源配套相对薄弱的现状，外部环境对就医出行需求的拉动能力有限。冷水江市 b 值仅为 0.0296，为全市最低，受人口规模偏小、人口外流、经济增长乏力等负面因素影响，系统外部缺乏有效的需求增长驱动力，难以形成规模化的就医出行需求，与该区域持续低迷的需求现状完全匹配。

结合表 1 可知，所有区县后验差比 $C < 0.35$ （冷水江市 $C = 0.46 \geq 0.35$ ），精度等级均为一级或二级，因此模型可用于短期预测。

3.2.2. 预测未来需求强度指数并检验误差

本文以 2020~2024 年娄底市各区县经熵权法测算得到的需求强度指数原始序列为基础数据集，依托已完成参数校准与精度检验的各区县 GM (1, 1)灰色预测模型，通过时间响应公式与累减还原公式迭代运算，推演得到 2025~2026 年各区县非紧急就医出行需求强度指数预测值；同时结合各区县 2024 年实际需求强度指数与逐年预测数值，核算得到各区域需求强度指数年均增长率，最终汇总形成各区县未来两年需求预测核心数据，具体结果如表 7 所示。

Table 7. Forecast of demand intensity index for districts and counties of Loudi city (2025~2026)
表 7. 2025~2026 年娄底市各区县需求强度指数预测

区县	2024 (实际)	2025 (预测)	2026 (预测)	年均增长率
娄星区	0.830	0.8858	0.9513	7.06%
双峰县	0.248	0.2634	0.2885	7.86%
新化县	0.488	0.5045	0.5288	4.09%
冷水江市	0.021	0.0272	0.0268	-
涟源市	0.373	0.3867	0.4053	4.24%

由表 7 数据得知：娄星区 2026 年预测需求强度指数达 0.9513，年均增长 7.06%，继续保持首位。作为市中心，其经济集聚效应和人口密度将持续推高就医出行需求；新化县 2026 年预测指数达 0.5288，年均增长 4.09%，排名第二。作为人口第一大县，庞大的人口基数支撑稳定增长；涟源市 2026 年预测达 0.4053，年均增长 4.24%，排名第三；双峰县 2026 年预测达 0.2885，年均增长 7.86%，增速最快。虽然目前需求强度指数较低，但增长势头明显，值得关注；冷水江市 2026 年预测约 0.0268，基本持平于 2024 年水平，需求持续低迷。

为验证 GM (1, 1)模型的预测可靠性与适配性，本文采用留一法开展回测检验，具体数据生成逻辑为：统一剔除 2024 年原始实测数据，以 2020~2023 年各区县需求强度指数为训练样本重构灰色预测模型，推演得到 2024 年各区县需求强度指数预测值，再将预测值与前文测算的 2024 年真实需求强度指数进行比对，通过绝对误差、相对误差计算公式量化模型预测偏差，全方位核验模型对不同需求层级区域的预测精度，最终得到模型一致性检验数据，具体结果如表 8 所示。

Table 8. Model consistency check results
表 8. 模型一致性检验结果

区县	预测值	真实值	绝对误差	相对误差
娄星区	0.8113	0.8300	0.0187	2.25%

续表

双峰县	0.2193	0.2480	0.0287	11.58%
新化县	0.4640	0.4880	0.0240	4.92%
冷水江市	0.0444	0.0210	0.0234	111.49%
涟源市	0.3582	0.3730	0.0148	3.96%

由表 8 可得, 高需求区域分别为娄星区、新化县、涟源市, 其相对误差均低于 5%, 分别为 2.25%、4.92%、3.96%。由此表明模型对核心需求区域的预测具有较高精度, 可直接用于运力规划决策; 双峰县的相对误差为 11.88%, 略高于 10%。考虑到双峰县需求强度指数绝对值(0.248)仅为娄星区的 30%, 0.0287 的绝对误差在实际运力配置中影响有限。建议在后续研究中单独关注该区域; 冷水江市相对误差为 111.49%, 但绝对误差仅为 0.0234。这是由于该区域需求指数极低(0.021), 微小绝对偏差在相对计算中被放大的数学特性所致。从实际应用角度看, 0.0234 的需求强度指数差异对应的运力需求微乎其微, 不影响整体运力配置决策。

综合表 8 的两组数值实验结果, 充分验证了熵权综合评估模型与 GM (1, 1)灰色预测模型适配娄底市非紧急就医出行场景的可行性。首先, 依托 2020~2024 年区县 GDP、常住人口年鉴数据, 经极差标准化消除量纲、熵权法客观赋权后证实经济水平是决定区域就医需求分化的核心要素, 测算得出的需求强度指数精准划分出娄星区高需求; 新化县、涟源市、双峰县中需求; 冷水江市低需求三级空间格局, 空间热力图直观呈现全市需求不均衡的分布现状, 为差异化运力投放提供一定依据。其次, 基于各区县历年需求序列分别构建 GM (1, 1)模型, 通过后验差比、小误差概率完成精度判定, 除冷水江市为二级合格外其余四区模型均达到一级最优标准; 留一交叉回测进一步证明模型对中高需求核心区预测误差控制在 5%以内, 仅低基数区县存在相对误差虚高问题, 不影响实操决策。由 2025~2026 年的预测数据显示, 除冷水江市需求小幅回落外, 其余区县需求指数均保持 4%~8%稳定年均增速, 中心城区增长动能最为突出。整体实验数据与娄底各区县经济、人口、人口流动现实特征高度匹配, 量化结果可直接支撑网约车“移动救护车”分区域、分时段运力调度方案设计, 并为其提供了完整实证数据支撑。

3.3. 基于需求预测的网约车“移动救护车”差异化运营模式设计

前文已通过熵权法完成各区县静态需求分级, 借助 GM (1, 1)模型完成短期需求增速预判, 并识别出早晚高峰 70%集中的就医出行时段。本节以三组核心实证结果为设计依据: 一是 2024 年需求强度指数形成的“一高、三中、一低”空间格局(娄星区 0.830、新化县 0.488、涟源市 0.373、双峰县 0.248、冷水江市 0.021); 二是 GM (1, 1)模型输出的 2025~2026 年增长趋势(娄星区 7.06%、双峰县 7.86%、涟源市 4.24%、新化县 4.09%、冷水江市基本持平)及灰色作用量层级分化(娄星区 0.6005 最高、冷水江市 0.0296 最低); 三是留一法回测验证的模型精度差异(高需求区相对误差 < 5%, 冷水江市绝对误差仅 0.0234)。据此, 从空间分层运营、分时运力调度、长效配套保障三个维度, 构建适配娄底市区县差异的网约车“移动救护车”一体化运营模式。

1) 分层空间运营模式

结合 2024 年需求强度指数分级、2025~2026 年预测增速及灰色作用量所反映的基础驱动势能, 将娄底五区县划分为三类运营单元, 实行差异化的车辆投放、网点布局与服务模式。

娄星区 2024 年需求强度指数为 0.830, 占全市需求总量约 42%, 灰色作用量 0.6005 居全市首位, 表明其就医出行需求的基础驱动势能最强; GM (1, 1)预测 2026 年指数将达 0.9513, 年均增长 7.06%, 且留一法回测相对误差仅 2.25%, 模型预测可靠性最高。基于上述特征, 采用“固定驻点 + 动态巡游”复合

运营模式：在市中心医院、市妇幼保健院、社区卫生服务中心等医疗资源密集区域设置 5~8 个固定就医车辆驻点，每个驻点配置 2~3 辆专职车辆；早晚高峰时段驻点车辆保有量在平峰基础上提升 30% (对应早晚高峰需求占比各 35% 的时段特征)；依托预测的 7.06% 年均增速，按年度递增 10%~15% 的专职车辆规模，确保运力增长与需求扩张同步；设立专属司机运营班组，长期定点深耕医疗出行订单，提升服务熟练度与响应速度。

三县 2024 年需求指数介于 0.248~0.488 之间，合计占全市需求约 57%，但增长逻辑与人口结构差异显著，不宜统一施策。

新化县常住人口 114.23 万为全市最多，但需求强度指数仅 0.488，人均就医出行强度偏低，反映出优质医疗资源不足、部分患者需前往娄底区就医的现实。灰色作用量 0.3893 居第二，人口刚需形成稳定驱动；预测年均增长 4.09%，增速平稳。据此，在县人民医院、县中医院配置 3~4 辆固定驻点车辆；针对乡镇人口分散特征，开通“乡镇卫生院-县城医院”预约支线，采用定时定点接送模式；重点增设“新化-娄底”跨区就医专线，承接需前往娄底中心城区就诊的患者预约订单，按日固定 2~3 班次往返，解决跨区就医出行痛点。

涟源市需求指数 0.373，灰色作用量 0.2991 处于中等，预测年均增长 4.24%，经济与人口均居全市中位，需求增长平稳。采用“县城综合医院 2~3 辆固定驻点 + 线上预约派单”模式，维持稳定车辆投放规模，不盲目扩张；平峰时段以预约接单为主，高峰时段根据需求指数增投 15% 运力。

双峰县 2024 年需求指数 0.248 为中需求区最低，但 GM (1, 1) 发展系数 -0.0912 绝对值最大，预测年均增长 7.86% 为全市最快，灰色作用量 0.1586 虽偏低但增长动能突出。鉴于留一法回测相对误差 11.58% 略高于 10%，运力规划宜采用“小步快跑”策略：逐年随需求增长固定车辆，同步预留扩容空间；密切跟踪实际订单数据，每半年校准一次运力规模，避免因预测误差导致运力闲置或不足。

冷水江市 2024 年需求指数仅 0.021，占全市需求约 1%，灰色作用量 0.0296 为全市最低，GM (1, 1) 预测 2026 年基本持平于 0.0268，且发展系数为正 (+0.0179)，呈微弱下降趋势。虽留一法回测相对误差达 111.49%，但绝对误差仅 0.0234，对实际运力配置影响可忽略。考虑到冷水江市与涟源市、新化县接壤，跨区调运车辆距离过远 (至娄底区约 70 公里) 不具可行性，采用“县域内轻量化预约 + 边界镇邻县协同”模式：不在冷水江市区保留专职驻点车辆，而是注册 2~3 名兼职司机承接县域内零散就医预约订单；在冷水江与涟源交界的乡镇 (如金石镇、渡头塘镇一带)，与涟源市驻点车辆共享运力，由距离更近的涟源车辆接单；取消专项高峰加价，以基础平价运营，最大限度降低平台运营成本，避免运力闲置浪费。

2) 分时运力调度运营模式

本文测算得出早高峰、晚高峰各占就医出行总量 35%，平峰合计占 30%，且各区县分时需求指数差异显著 (娄底区早晚高峰各 0.290，冷水江市仅 0.007)。据此设立“高峰前置投放、平峰精简流转、模型动态校准”的分时调度机制。

对于高峰前置投放机制：提前 30 分钟向对应需求区域投放增量车辆。增投比例与各区县分时需求指数挂钩：高需求区 (娄底区) 早晚高峰增投 30% 运力 (对应其 0.290 的高峰需求指数)；中需求区增投 15% (新化 0.171、涟源 0.131、双峰 0.087，按需求强度在 10%~20% 区间内差异化设置)；低需求区 (冷水江) 不增投，依靠兼职司机预约接单。高峰订单优先匹配经过医疗服务培训的专职司机，缩短患者等车时长，目标响应时间控制在 5 分钟以内。

对于平峰精简流转机制：平峰时段收回增量车辆，仅保留基础驻点运力，将闲置车辆调配至普通网约车订单池，提高车辆日均接单率与运营效率；针对平峰就医出行计划性强的特点 (如定期透析、化疗复查、取药等)，大力推广提前 24 小时预约制，平台根据预约订单数量精准调度车辆，减少空驶；夜间平峰仅在娄底区保留 1~2 辆应急值守车辆，应对急诊复诊等零星订单，其余区域采用预约制响应。

依托 GM (1, 1)模型对高需求区的高精度预测能力(娄星区、新化县、涟源市留一法相对误差均低于 5%), 每季度更新一次需求预测数据, 据此调整下一季度各区县运力配置基数; 对双峰县(误差 11.58%)和冷水江市(低基数高相对误差)采用月度实际订单数据校准, 以实际运营数据修正模型预测偏差, 形成“预测-投放-反馈-修正”的闭环调度体系。

3) 配套长效运营保障模式

为保障分层、分时运营模式可持续落地, 结合医疗出行特殊属性与各区县运营成本差异, 设计三项配套保障机制。

差异化司机激励机制: 根据各区县订单密度与运营成本实行差异化补贴, 而非统一标准。娄星区订单密度高、司机收入有保障, 就医订单附加 3~5 元/单的专项服务补贴; 中需求区订单密度中等, 附加 5~8 元/单补贴; 冷水江市等低需求区订单零散, 兼职司机按 10~15 元/单给予较高补贴以保障接单意愿。所有就医订单同步提高平台信用积分, 积分可兑换优先派单权, 形成长期激励。乘客端不实行高峰加价, 就医出行补贴由平台服务费与政府民生项目资金共同承担, 避免将运力成本转嫁给患者。

车辆服务标准化机制: 纳入“移动救护车”运营的车辆统一配备消毒用品、呕吐袋、简易扶手、应急医药包, 定期强制车内消杀(每周不少于 1 次); 根据服务场景分级配置: 跨区就医专线车辆额外配备轮椅固定装置、输液架固定点, 县城驻点车辆配备基础急救包; 建立医疗出行专属车辆标识与司机培训认证体系, 专职司机需完成基础急救知识、老年乘客服务规范等培训后方可上岗。

风险兜底与法律边界机制: 平台统一为所有就医订单投保出行意外险, 保额不低于 50 万元; 明确“移动救护车”为非紧急就医辅助出行服务, 不具备急救功能, 不替代 120 急救车辆, 在乘客下单页面显著提示服务边界; 制定免责服务条款, 对乘客隐瞒病情、突发疾病等情形明确责任划分; 与当地卫健部门、医疗机构建立沟通机制, 争取将“移动救护车”纳入城市非紧急医疗转运服务体系, 获得政策支持与合规背书。

综上, 本套运营模式以本文测算的区域需求强度、时段分布、未来增长预测及模型精度数据为决策依据, 每个运营策略均对应具体实证结论, 该模式针对性解决不同区县供需错配、高峰运力不足、低需求区域资源浪费三大运营痛点, 实现网约车“移动救护车”精细化、低成本可持续运营。

4. 结论

本文以娄底市为实证区域, 构建基于熵权法的非紧急就医出行需求强度指数, 并运用灰色预测模型 GM (1, 1)对 2025~2026 年需求趋势进行预测; 依托区域需求分级、分时需求特征与未来增长预判, 分层设计适配不同区县的网约车“移动救护车”差异化运营模式, 形成需求量化、趋势预判与运营落地的完整研究链条, 主要研究结论如下:

第一, 区域需求分布呈现显著的非均衡特征。2024 年娄底市各区县非紧急就医出行需求强度指数由高到低依次为: 娄星区(0.830)、新化县(0.488)、涟源市(0.373)、双峰县(0.248)、冷水江市(0.021)。其中, 高需求区域(娄星区)与中需求区域(新化县、涟源市、双峰县)的需求合计占比约为 95%, 构成运力配置的核心空间; 冷水江市因人口规模与经济体量双重受限, 需求持续处于低位。该分布格局与 GDP、常住人口等宏观指标高度耦合, 验证了以经济和人口双维度评估区域就医出行需求的有效性。

第二, 需求时序波动与通勤节律高度同构, 呈现双峰集聚特征。就医出行需求在早晚高峰时段(7:00~9:00, 17:00~19:00)合计占比达 70%平峰时段占 30%。这表明非紧急就医行为与日常通勤存在显著的时空叠合, 平台需遵循“高峰预置、平峰保底”的运力调度原则。

第三, 灰色预测模型对核心需求区域具有优良的短期预测性能。经后验差比 C 与小误差概率 P 检验, 娄星区、双峰县、新化县、涟源市的 GM (1, 1)模型精度均达一级(好), 冷水江市为二级(合格)。留一法回

测显示, 娄底区、新化县、涟源市的相对误差均低于 5%。模型一致性良好; 冷水江市相对误差虽高, 但绝对误差仅为 0.0234, 在实际运力决策中可忽略。预测结果表明, 2025~2026 年高需求区域需求强度指数将保持稳定增长: 娄底区预计达 0.951, 新化县达 0.5288, 涟源市达 0.4053, 双峰县达 0.2885, 而冷水江市基本持平。上述结果可为网约车平台未来两年的运力储备与区域间车辆调拨提供量化依据。

第四, 非紧急就医出行服务的可持续运营需依托差异化调度、动态定价与司机激励的协同机制。基于上述预测, 本文提出以下具有普适性的运营策略: 1) 空间差异化部署: 在高热点区域(娄底区)与中热点区域(新化县、涟源市、双峰县)的早晚高峰时段提前预置运力, 需求强度指数高于 0.50 的区域和时段可适度实施 10%~20% 的价格上浮, 以平衡供需; 2) 司机激励与风险保障: 对就医订单设置 5~10 元专项服务费并直接补贴司机, 配套车内清洁险与平台信用分奖励, 降低司机接单顾虑; 3) 服务标准化建设: 车内配置基础消毒用品、呕吐袋与简易扶手, 明确标识“就医出行”订单属性与司机培训资质, 并由平台投保额外意外险; 4) 响应可靠性保障: 建立就医订单实时监控与延误自动匹配机制, 确保备用车辆响应时间不超过 5 分钟; 5) 法律风险规避: 参考“无障碍出行”服务模式, 通过免责条款与责任保险分散运营风险。

综上所述, 本研究将灰色系统理论应用于非紧急就医出行需求预测, 证实了 GM(1, 1)模型在小样本、信息不完全情境下的适用性, 所构建的需求评估、趋势预测与运营响应分析框架, 不仅可为娄底市网约车“移动救护车”服务的运力调度与高峰时段资源配置提供直接决策支持, 亦可为同类型城市在发展非紧急医疗辅助出行服务时提供可复制的方法论参考与政策借鉴。

基金项目

湖南省大学生创新训练计划项目(项目编号: S202510553041)。

参考文献

- [1] 朱明明. 基于短时需求预测的网约车调度优化[D]: [硕士学位论文]. 长安: 长安大学, 2023.
- [2] 王金城. 基于出行需求预测的城际网约车调度优化研究[D]: [博士学位论文]. 长安: 长安大学, 2022.
- [3] 王璐瑶. 基于轨迹数据的网约车群智路径优化研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京林业大学, 2022.
- [4] 缪格, 袁鹏程. 基于优化遗传算法的网约车合乘模型[J]. 计算机系统应用, 2022, 31(12): 287-293.
- [5] 武书羽. 基于建成环境的热点区域网约车出行影响因素分析与需求预测[D]: [硕士学位论文]. 长安: 长安大学, 2023.
- [6] 陈志举, 刘锴, 王江波. 网约车出行分布时空模式及其时间序列模式识别[J]. 地球信息科学学报, 2024, 26(10): 2229-2242.
- [7] 蔡建湖, 丁玉姣, 曹朕纲, 等. “人货合乘”模式下考虑碳排放成本的网约车路径优化[J]. 物流技术, 2024, 43(4): 125-137.
- [8] 白竹, 马文慧, 秘梦迪, 等. 基于改进 DBSCAN 的网约车出行需求预测[J]. 黑龙江工程学院学报, 2024, 38(2): 28-36.
- [9] 陈茜. 网络预约出租车智能调度系统的研究与设计[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京化工大学, 2019.
- [10] Syed, A.A., Dandl, F. and Bogenberger, K. (2021) User-Assignment Strategy Considering Future Imbalance Impacts for Ride Hailing. 2021 *IEEE International Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, Indianapolis, 19-22 September 2021, 2441-2446. <https://doi.org/10.1109/itsc48978.2021.9564559>
- [11] 娄底市统计局. 娄底市统计年鉴[EB/OL]. <https://tjj.hnloudi.gov.cn/ldtjj/tjsj/tjcbw/list.shtml>, 2026-06-08.