· 论著 ·

南京市固定献血点献血人次的影响因素及其空间异质性分析

李张晖　梁文飚　胡文佳　陈显　袁文青　蒋昵真
(江苏省血液中心,江苏 南京 210042)

摘要:目的　分析南京市固定献血点献血人次的时间相关影响因素及献血点间差异,为固定献血点布局优化与运行管理提供参考。**方法**　基于南京市 17 个固定献血点 2025 年全年日度献血数据,匹配同期气象与空气质量数据,构建两阶段负二项广义线性混合效应模型(negative binomial generalized linear mixed model,NB-GLMM)。第一阶段以是否下雨、星期类型、月份、节假日、气温及 PM2.5 等级为固定效应,献血点为随机截距;第二阶段再加入献血点层面的静态特征(景点数量、工作时长、商超数量、公共交通站点数量、医院数量、大学数量、住宅数量)。采用赤池信息准则(AIC)进行模型比较,通过似然比检验评估随机效应显著性,并基于经验贝叶斯估计提取献血点效应。通过残差诊断及多种敏感性分析验证结果稳健性。**结果**　第一阶段模型显示,下雨与献血人次下降相关(IRR=0.943,P<0.001);节假日与献血人次增加相关(IRR=1.162,P<0.001);星期六及星期日献血人次均高于星期一,其中星期日关联最明显(IRR=1.195,P<0.001)。气温一次项及二次项联合结果提示献血人次与气温之间存在非线性关联。第二阶段加入静态特征后发现,景点数量(IRR=1.372,P=0.008)及工作时长(IRR=1.823,P<0.001)与献血人次增加相关,商超、公共交通站点、医院、大学及住宅数量均无显著效应。**结论**　南京市固定献血点献血人次受天气、星期类型、节假日及献血点周边环境等多种因素共同影响。不同献血点之间存在明显异质性,延长工作时长及周边景点数量与献血人次增加相关。

关键词:固定献血点;献血人次;负二项混合效应模型;IRR;血液管理
中图分类号:R457.1　R193.3　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1004-549X(2026)7-0908-09
DOI:10.13303/j.cjbt.issn.1004-549x.2026.07.014

Factors influencing daily blood donation attendance and their spatial heterogeneity at fixed donation sites in Nanjing

LI Zhanghui, LIANG Wenbiao, HU Wenjia, CHEN Xian, YUAN Wenqing, JIANG Nizhen.
Jiangsu Blood Center, Nanjing 210042, *China.*
Corresponding author: JIANG Nizhen, Email: jiangnizhen@yahoo.com

Abstract: Objective　To analyze the time-related factors influencing daily blood donation attendance at fixed donation sites in Nanjing and the heterogeneity among sites, and to provide evidence for optimizing site layout and operational management. **Methods**　Based on daily attendance data from 17 fixed donation sites in Nanjing for the full year of 2025, matched with contemporaneous meteorological and air quality data, a two-stage negative binomial generalized linear mixed model (NB-GLMM) was constructed. In the second stage, site-level static characteristics (number of scenic spots, daily operating hours, number of shopping malls, public transport stops, hospitals, universities, and residential buildings) were additionally incorporated. Model comparison was performed using Akaike information criterion (AIC). Significance of random effects was tested by likelihood ratio test, and site-specific random effects were extracted using empirical Bayes estimation. Robustness of the results was verified through residual diagnostics and multiple sensitivity analyses. **Results**　The first-stage model showed that rainfall was associated with lower attendance (IRR=0.943, P<0.001); holidays were associated with higher attendance (IRR=1.162, P<0.001); Saturdays and Sundays showed higher attendance than Mondays, with the strongest association on Sundays (IRR=1.195, P<0.001). Temperature exhibited a non-linear relationship (linear term P=0.051, quadratic term P=0.036). The joint results of the linear and quadratic terms for temperature suggested a nonlinear relationship between attendance and temperature. After introducing static characteristics in the second stage, the number of scenic spots (IRR=1.372, P=0.008) and daily operating hours (IRR=1.823, P<0.001) were found to be

基金项目:江苏省重点研发计划(社会发展)面上(BE2022811)
第一作者简介:李张晖(1998-),男,初级检验师,Email:li963353859@163.com;**通信作者:**蒋昵真,Email: jiangnizhen@yahoo.com

positively associated with attendance, while the numbers of shopping malls, public transport stops, hospitals, universities, and residential buildings showed no significant effects. **Conclusion** Daily blood donation attendance at fixed sites in Nanjing is influenced by multiple factors including weather, day of the week, holidays, and site surroundings. Substantial heterogeneity exists among different sites; extended operating hours and more nearby scenic spots are associated with increased attendance.

Key words: fixed blood donation site; blood donation attendance; negative binomial mixedeffects model; IRR; blood management

无偿献血是保障临床用血安全与医疗服务正常运行的重要基础,而固定献血点作为血液采集体系的重要组成部分,其运行效率直接关系到血液供给的稳定性与可持续性。既有研究表明,献血人次受多种因素影响,包括天气条件、时间分布及人群行为特征等[1]。然而,上述因素在时间维度与空间维度上交织存在,造成不同献血点之间的效率差异难以被准确识别与解释。

从分析框架上看,影响献血点献血人次的因素大致可分为两类:一类为随时间变化的外部环境因素(如降水、气温、空气质量、星期效应、季节性波动及法定节假日),另一类为相对稳定的献血点固有特征(如区位条件及服务能力)。现有研究多集中于宏观层面的供血体系管理,或针对单一献血点开展运营优化分析,较少在统一统计框架下同时控制时间变动因素并量化献血点层面的随机截距,从而限制了对献血点效率差异来源的系统性认识。这一研究缺口提示现有选址策略多依赖经验判断,缺乏对献血点随机效应的定量分解。

在方法选择上,献血人次属于典型计数资料,常伴随过度离散及层级结构特征,传统线性模型或 Poisson 模型可能难以准确处理[2]。相比之下,负二项分布能更好地刻画计数数据的离散特征;在此基础上构建的负二项广义线性混合效应模型(NB-GLMM)不仅能够处理计数型响应变量,还能通过引入随机效应刻画不同献血点之间的异质性,提供更为合理的建模框架[3]。

基于上述背景,本研究构建了两阶段分析框架。第一阶段利用南京市 17 个固定献血点 2025 年全年日度数据,建立以降水、PM2.5 等级、气温、星期类型、月份及节假日为固定效应、献血点为随机截距的负二项混合效应模型,在控制时间变动因素的基础上识别献血点之间的固有效率差异。第二阶段进一步引入献血点层面的静态特征变量:景点数量、工作时长、商超数量、公共交通站点数量、医院数量、大学数量、住宅数量,构建扩展模型以解释献血点间差异的结构性来源,从而实现从“差异测量”向“机制解释”的拓展。

本研究旨在从时间效应与空间异质性两个维度系统分析固定献血点运行效率的影响机制,为献血点选址优化、资源配置及服务策略制定提供量化参考。

1 资料与方法

1.1 数据来源与处理

运营数据:来源于血液中心信息管理系统,涵盖了南京市 17 个固定献血点在 2025 年 1 月 1 日至 12 月 31 日期间的每日献血记录。经过清洗(部分献血点并非一周全部上班导致观测数少于 365 天,但无系统性偏倚),共获得有效观测值 5 324 条。每条记录包括:献血点名称、日期、当日献血人次,根据日期信息衍生出“星期几”(星期一至星期日)和“月份”(1 月至 12 月)两个分类变量。

气象与空气质量数据:通过 OpenMeteo 气候数据存档 API 获取南京市逐日平均气温(℃)及逐小时 PM2.5 浓度(μg/m^3)。将 PM2.5 小时数据按日期聚合为日平均值,并依据中国《环境空气质量标准》(GB30952026)二级标准 24 小时平均限值划分为三档:优(≤35 μg/m^3)、良(35~75 μg/m^3)、污染(75 μg/m^3)。降水数据以二元变量“是否下雨”表示(1=下雨,0=不下雨)。所有气象与空气质量数据按日期与献血记录一一匹配,无缺失观测。

节假日数据:使用 Chinese calendar 库(基于国务院发布的节假日安排)标记每日是否为法定节假日,并同时结合星期特征识别调休工作日。二元变量“是否节假日”取值:1=节假日(含法定假日及调休补假),0=非节假日(含普通工作日及调休工作日)。

献血点特征数据:通过实地调研与高德地图 POI(兴趣点)数据采集获得,涵盖 17 个献血点的 7 项静态特征,包括:献血点周边 1 000 m 半径内的“商超数量”“景点数量”“公共交通站点数量”“医院数量”“大学数量”“住宅数量”以及各个献血点

的“每日工作时长(h)”[4]。所有献血点特征变量在研究期间视为时间不变,用于刻画献血点的结构性属性。

1.2　变量定义

变量定义见表 1。

表 1　变量定义

Table 1　Variable definitions

	变量名	定义与取值
时间相关变量	下雨(Rain)	二元变量,1 = 下雨,0 = 不下雨(参照:不下雨)
	气温(Temp)	连续变量,单位℃,分析时进行中心化处理(减去均值)
	节假日(Holiday)	二元变量,1 = 节假日,0 = 工作日(参照:非节假日)
	PM2.5 等级	无序多分类:优(≤35 μg/m^3)、良(3575 μg/m^3)、污染(75 μg/m^3),(参照:优)
	星期类型(Day of the week)	无序多分类,星期一至星期日(参照:星期一)
	月份(Month)	无序多分类,1 月至 12 月(参照:1 月)
因变量	献血人次(Attendance)	每日每个献血点的献血总人次(计数资料)
献血点静态特征	商超数量	献血点周边 1 000m 半径内商场及超市的个数(类型代码:060101、060102)
	大学数量	献血点周边 1 000 m 半径内大学和大专的个数(类型代码:141200、141300)
	医院数量	献血点周边 1 000 m 半径内大型综合医院的个数(类型代码:090100)
	景点数量	献血点周边 1 000 m 半径内景点的个数(类型代码:110100、110200、110300)
	每日工作时长	献血点每日工作时长,以小时为单位
	公共交通站点数量	献血点周边 1 000 m 半径内地铁站和公交站的个数(类型代码:150400、150500)
	住宅数量	献血点周边 1 000 m 半径内住宅的个数(类型代码:120302)

1.3　固定效应结构选择

献血行为受天气、星期类型、假期等多重外部因素影响,需采用能够同时控制固定效应与随机效应的混合模型进行分解[5],为确定最优的固定效应组合,直接在 NB-GLMM 模型框架内,依据赤池信息准则(AIC)比较逐次加入变量的模型拟合优度。候选模型依次为:m1:仅下雨;m2:m1+星期类型;m3:m2+月份;m4:m3+PM2.5 等级;m5:m4+节假日;m6:m5+气温一次项和二次项。气温二次项的纳入基于既往研究提示气温对献血行为可能存在非线性效应[6]。最后选取 AIC 值最小的模型作为第一阶段分析的最终模型。

1.4　第一阶段:负二项混合效应模型(NB-GLMM)

鉴于献血人次为计数资料且可能存在过度离散,本研究以负二项混合效应模型进行分析,模型献血点作为层级变量纳入随机效应,用于控制不同献血点之间的基线差异[7]。在 NB-GLMM 中,以献血点作为随机截距项,模型表达式为:

$$Y_{ij} \sim \text{NegativeBinomial}(\mu_{ij},\theta)$$

$$log(\mu_{ij}) = \beta_0 + \beta 1 * Rain_{ij} + \beta_2 * \text{Holiday}_{ij} + \beta_3 * \text{PM2.5}_{ij} + \beta_4 * \text{Temp}_{ij} + \beta_5 * \text{Temp}_{ij}^2 + \beta_6 * \text{Weekday}_{ij} + \beta_7 * \text{Month}_{ij} + \mu_j$$

θ 为负二项分布的过度离散参数,i 表示第 i 次观测,j 表示第 j 个献血点,Y_{ij} 表示第 j 个献血点在第 i 日的献血人次,β_0 为固定截距,$\beta_1 \sim \beta_7$ 为固定效应回归系数,μ_j 为第 j 个献血点的随机截距。模型采用最大似然估计,使用 glmmTMB 包中的 nbinom2 分布进行拟合。

1.5　第二阶段:扩展负二项混合模型(融合模型)

为解释献血点之间的献血点层随机截距,在第一阶段模型基础上引入献血点静态特征变量,构建扩展模型:

$$\log(\mu_{ij}) = \beta_0 + \beta_1 * \text{Rain}_{ij} + \beta_2 * \text{Holiday}_{ij} + \beta_3 * \text{PM2.5}_{ij} + \beta_4 * \text{Temp}_{ij} + \beta_5 * \text{Temp}_{ij}^2 + \beta_6 * \text{Weekday}_{ij} + \beta_7 * \text{Month}_{ij} + \gamma Z_j + \mu_j$$

Z_j 为献血点层面的静态特征变量,γ 为其回归系数。为避免多重共线性问题,对献血点变量进行 Pearson 相关性检验及方差膨胀因子(VIF)诊断,以 VIF>10 作为存在严重多重共线性的判断标准[8];对连续变量进行 Z-score 标准化处理,并在必要时进行变量筛选。考虑到二级单元样本量较小(仅 17 个献血点),采用 Bootstrap 方法(1 000 次重采样)计算回归系数的置信区间,以增强统计推断的稳健性[9]。

1.6　献血点差异解释度评估

通过比较引入献血点特征前后随机效应方差的变化,评估静态特征对献血点间差异的解释程度:

$$\text{解释度} = \frac{\sigma^2_{\text{baseline}} - \sigma^2_{\text{extended}}}{\sigma^2_{\text{baseline}}}$$

$\sigma^2_{\text{baseline}}$ 代表第一阶段(未引入献血点静态特征)模型的随机截距方差,而 $\sigma^2_{\text{extended}}$ 代表第二阶段(引入献血点静态特征)模型的随机截距方差。该指标用于量化“空间变量解释了多少献血点差异”,是第二阶段分析的核心指标[10]。

1.7　IRR 提取与解释

由于 NB-GLMM 采用对数链接函数(log link),模型回归系数(β)表示对数尺度上的变化,因此进一步转换为发生率比(incidence rate ratio,IRR)进行解释[11]。IRR 计算公式如下:

$$IRR = e^{\beta}$$

IRR>1 表示变量与献血人次增加相关;IRR<1 表示变量与献血人次下降相关;IRR = 1 表示变量与献血人次无明显关联。例如当 $\beta = 0.6$,$IRR = e^{0.6} = 1.822$,表示变量每增加 1 个单位时,献血人次期望值增加 82.2%。

此外,为进一步解释不同献血点之间的差异,本研究采用经验贝叶斯方法提取各献血点随机截距预测值(conditional modes),并指数化后转换为相对于总体平均水平的变化比例:

$$随机效应估计值(\%) = [\exp(\widehat{\mu_j}) - 1] \times 100\%$$

正值表示该献血点献血人次高于平均水平,负值表示低于平均水平,该指标用于反映在控制天气、星期类型、月份等固定效应后,不同献血点之间剩余的献血点点层差异[12]。

1.8 模型诊断与稳健性分析

为评估模型假设的满足程度及结果的可靠性,进行以下分析:

残差诊断:采用 DHARMa 包进行模拟残差检验,包括 KS 检验(评估残差分布与理论分布的偏离)、过度离散检验和离群值检验,并绘制 Pearson 残差与拟合值散点图、残差 QQ 图、残差直方图及随机效应 QQ 图。

更换参照组:将下雨参照由“不下雨”改为“下雨”、星期类型参照改为“周日”、月份参照改为“7 月”,假期参照从“非假期”改为“假期”,验证固定效应系数是否符号相反、绝对值不变。

剔除异常值:基于 Pearson 残差绝对值>3 的标准识别异常观测,剔除后重新拟合模型,比较关键系数的变化。

与线性混合模型对比:拟合线性混合模型(linear mixed model,LMM),因变量为 log(献血人次+1),比较两种模型在主要固定效应上的方向与显著性一致性。

1.9 统计分析工具

数据清洗使用 dplyr、tidyr、lubridate 包;地图 POI 点数据获取使用 jsonlite 包;NB-GLMM 拟合使用 glmmTMB 包;模型诊断使用 performance、DHARMa 和基础绘图系统。显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$,所有检验均为双侧检验。

2 结果

共纳入南京市 17 个固定献血点 2025 年 1 月 1 日至 12 月 31 日的日度献血数据,有效观测值 5 324 条。分析时段内,下雨天数占比 44.9%,节假日占比约 11.2%,各献血点观测分布较为均衡,未发现明显缺失或极端偏倚情况。

2.1 模型选择与固定效应结构

为确定最优固定效应组合,在负二项混合效应模型框架内逐次加入变量,依据赤池信息准则(AIC)进行比较。模型 1 仅含下雨效应,模型 2 增加星期效应,模型 3 增加月份效应,模型 4 增加 PM2.5 等级,模型 5 增加节假日效应,模型 6 增加气温一次项和二次项。各模型 AIC 值分别为:模型 1:28502.03,模型 2:28318.2,模型 3:27986.6,模型 4:27988.3,模型 5:27968.2,模型 6:27965.9。模型 6 的 AIC 值最小,显著优于其他模型。因此,第一阶段固定效应结构确定为“下雨+星期类型+月份+ PM2.5 等级+节假日+气温”。

2.2 固定效应估计结果

NB-GLMM 固定效应结果见表 2。结果显示下雨与献血人次显著负相关(IRR = 0.943,95% CI:0.915~0.972,$P<0.001$);周末献血人次均显著高于星期一,其中星期日关联最明显(IRR = 1.195,95%CI:1.124~1.271,$P<0.001$);法定节假日献血人次较非节假日也有增加(IRR = 1.162,95% CI:1.104~1.223,$P<0.001$);与 1 月相比,2 月、3 月献血人次显著增加(均 $P<0.05$),7 月至 12 月献血人次显著下降(均 $P<0.001$);气温一次项及二次项联合结果提示,献血人次与气温之间存在非线性关联;PM2.5 等级与献血人次未见显著统计学关联。

2.3 献血点随机效应

模型随机截距方差为 0.43(标准差 0.66),负二项分散参数 θ = 7.69,组内相关系数(ICC) = 0.78,表明献血点间的随机效应差异解释了总变异的约 78%,随机效应显著(似然比检验 $P<0.001$)。

基于经验贝叶斯方法提取各献血点的随机截距,并转换为随机效应估计值(相对于总体平均水平的百分比变化),结果见表 3。献血点间差异显著,随机效应最高的为大行宫献血点,其次为大洋百货和江苏省人民医院献血点;随机效应最低的为麒麟献血点,其次为山西路和铁心桥献血点。

表 2　影响献血人次的时间相关因素(负二项混合效应模型)

Table 2　Time-related factors associated with blood donation attendances (NB-GLMM)

	系数 β	标准误	IRR	*P* 值	显著性	百分比变化(%)
下雨(是 *vs* 否)	−0.058 6	0.017 5	0.943	<0.001	***	−5.69
星期:星期二	0.104 1	0.028 3	1.110	<0.001	***	10.97
星期:星期三	0.137 4	0.028 0	1.147	<0.001	***	14.73
星期:星期四	0.046 4	0.028 7	1.047	0.105 8	ns	4.75
星期:星期五	0.077 4	0.027 9	1.080	0.005 5	**	8.05
星期:星期六	0.146 1	0.040 9	1.157	<0.001	***	15.73
星期:星期日	0.178 1	0.040 4	1.195	<0.001	***	19.50
月份:2 月	0.171 1	0.036 9	1.187	<0.001	***	18.67
月份:3 月	0.095 9	0.039 9	1.101	0.016 3	*	10.07
月份:4 月	0.026 7	0.044 4	1.027	0.548 0	ns	2.70
月份:5 月	−0.008 7	0.043 1	0.991	0.839 6	ns	−0.87
月份:6 月	−0.002 6	0.042 8	0.997	0.951 7	ns	−0.26
月份:7 月	−0.243 3	0.041 7	0.784	<0.001	***	−21.59
月份:8 月	−0.234 8	0.040 4	0.790	<0.001	***	−20.92
月份:9 月	−0.152 4	0.042 9	0.859	<0.001	***	−14.14
月份:10 月	−0.189 7	0.044 0	0.827	<0.001	***	−17.28
月份:11 月	−0.267 0	0.042 6	0.766	<0.001	***	−23.44
月份:12 月	−0.191 2	0.038 2	0.826	<0.001	***	−17.41
pm25 _ level3 良	0.002 4	0.020 5	1.002	0.905 5	ns	0.24
pm25 _ level3 污染	0.018 2	0.021 0	1.018	0.387 8	ns	1.83
holiday_status 假期	0.150 5	0.033 7	1.162	<0.001	***	16.24
temp_c_sq	−0.000 3	0.000 2	1.000	0.035 6	*	−0.03
temp_c	0.004 4	0.002 2	1.004	0.051 2	ns	0.40

* *P*<0.05；** *P*<0.01；*** *P*<0.001；ns 不显著。

表 3　各献血点随机效应估计值与排名

Table 3　Random effect estimates and rankings of each donation site

排名	献血点	随机截距	随机效应估计值(%)
1	大行宫	1.450 6	326.58
2	大洋百货	1.086 2	196.29
3	江苏省人民医院	0.960 9	161.40
4	义乌	0.724 4	106.35
5	鼓楼	0.293 4	34.10
6	迈皋桥	0.143 3	15.41
7	殷巷	−0.094 9	−9.05
8	家乐福	−0.133 5	−12.50
9	尧化门	−0.251 9	−22.27
10	珠江路	−0.262 2	−23.07
11	招行	−0.307 0	−26.44
12	南京南站	−0.396 7	−32.74
13	竹山路	−0.510 2	−39.96
14	夫子庙	−0.589 2	−44.52
15	铁心桥	−0.593 1	−44.74
16	山西路	−0.709 8	−50.83
17	麒麟	−0.808 0	−55.43

2.4　模型诊断与稳健性检验

采用 DHARMa 模拟残差方法对模型拟合效果进行诊断。图 1A 显示 Pearson 残差与拟合值散点图中残差围绕零线随机分布,无明显系统性趋势,未发现异方差或非线性迹象。图 1B 为残差 Q-Q 图,点基本沿对角线分布,尾部轻微偏离但在可接受范围内,表明残差分布与负二项假设吻合良好。图 1C 残差直方图呈轻微正偏态分布,但无极端异常值聚集。图 1D 为随机截距 QQ 图:各点基本落在对角线附近,满足正态性假设。上述诊断结果表明模型假设基本得到满足,拟合效果良好。

对于模型敏感性验证,本研究更换参照组,将下雨参照由“不下雨”改为“下雨”、星期类型参照由“周一”改为“周日”、月份参照由“1 月”改为“7 月”后、假期参照由“非节假日”改为“节假日”,各固定效应系数的符号反转、绝对值保持不变,模型结论一致。基于 Pearson 残差绝对值大于 3 的标准剔除 66 个观测值(占 1.26%)后重新拟合模型,下雨效应系数从 −0.058 6 变为 −0.058 1(变化率 0.74%),方向与显著性未改变。同时,对这些极端值的核查发现,这些极端值以正残差为主,集中出现在 2025 年元旦、国庆等法定节假日,以及个别献血点在非节假日的突发性高量采集(如 3 月 19 日山西路献血人次高达 47 人,残差 18.53;12 月期间尧化门多次出现残差 5.5~5.8 的正向偏离),提示这些极端值主要源于节假日人流激增或临时团体献血活动,而非数据错误或模型缺陷,敏感性分析表明,剔除上述异常值后模型关键系数变化幅度不足 1%,因此这些极端值不影响模型的稳健性。构建线性混合模型,发现与 NBGLMM 在下雨、星期类型、月份、假期效应的方向和显著性上高度一致。综上,本研究构建的 NB-GLMM 模型的计算结果稳健可靠。

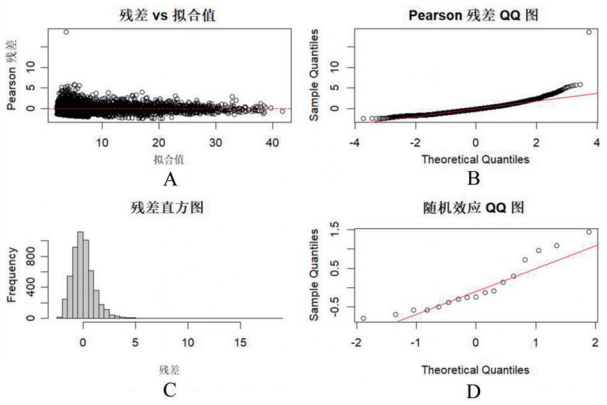


图 1　NB-GLMM 残差诊断图

Figure 1　Residual diagnostic plots for the NBGLMM

2.5　献血点静态特征与献血人次的关联分析

在第一阶段识别出显著的献血点间差异后,本研究进一步引入献血点层面的静态特征变量(商超数量、景点数量、公共交通站点数量、医院数量、大学数量、住宅数量和日均工作时长),构建扩展负二项混合效应模型,以探讨上述差异的结构性来源。为避免多重共线性,所有连续型自变量均经 Z-score 标准化处理,回归系数表示自变量每增加一个标准差时献血人次的变化百分比。

第二阶段联合混合模型中,与第一阶段一致,下雨、假期、星期类型及月份效应保持显著且方向相同。在献血点静态特征方面(表 4),周边景点数量和每日工作时长与献血人次呈显著正相关(P<0.05)。商超数量、公共交通站点数量、医院数量、大学数量及住宅数量均未达到统计学显著水平(P>0.05)。

引入静态特征后,随机截距方差由第一阶段的 0.43 下降至 0.092(标准差 0.30),组内相关系数(ICC)为 0.36,表明在控制时间因素和献血点特征后,剩余献血点间异质性解释了总变异的约 36%。对第一阶段模型与第二阶段模型进行似然比检验,结果显示,第二阶段模型的 AIC 为 27 434.47 低于第一阶段的 27 830.0,似然比检验显著(χ^2 = 409.53,df=7,P<0.001),表明献血点特征变量显著提升了模型拟合优度。由于献血点数量有限(n=17),我们采用献血点级 Bootstrap 方法(1000 次重采样)对景点数量和工作时长的回归系数重新估计 95%置信区间,以增强小样本下统计推断的稳健性。结果显示,景点数量的 Bootstrap 置信区间为[0.505,1.172],每日工作时长的 Bootstrap 置信区间为[0.685,0.984],两者均不包含 0,与原始模型中的显著性结论一致。这一结果支持景点数量及服务时长与献血人次存在正相关的发现,并表明该效应在献血点级重采样下具有较好的稳定性。多重共线性诊断发现所有变量的 VIF 值均低于 10(范围 1.94~8.63),未发现严重共线性。计算各献血点随机截距估计值及其对应的随机效应估计值发现,随机效应最高的献血点为江苏省人民医院、大行宫和殷巷献血点;最低的为山西路、家乐福和大洋百货献血点。

DHARMa 残差诊断分析显示(图 2),KS 检验残差分布与理论负二项分布无显著差异(P=0.11);过度离散检验(P=0.85)与异常值检验(P=0.70)均不显著,表明模型假设成立,拟合良好,无过度离散或异常值干扰。

表 4 献血点静态特征分析

Table 4 Analysis of static characteristics of donation sites

	系数 β	标准误	IRR	P 值	百分比变化	95% CI(百分比变化置信区间)	显著性
景点数量	0.316	0.118	1.372	0.008	37.116	(8.74,72.90)	**
每日工作时长	0.600	0.107	1.823	<0.001	82.289	(47.92,124.65)	***
商超数量	−0.139	0.177	0.870	0.432	−13.012	(−38.54,23.13)	ns
公共交通站点数量	−0.081	0.156	0.922	0.604	−7.791	(−32.12,25.26)	ns
医院数量	−0.216	0.141	0.806	0.126	−19.428	(−38.90,6.24)	ns
大学数量	0.131	0.151	1.140	0.383	14.049	(−15.14,53.28)	ns
住宅数量	0.014	0.217	1.014	0.949	1.410	(−33.74,55.21)	ns

* P<0.05; ** P<0.01; *** P<0.001; ns 不显著。

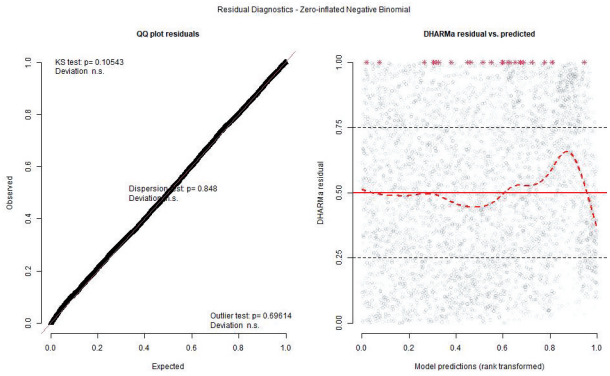


图 2 DHARMa 包对模型的残差诊断

Figure 2 Residual diagnostics for the model using the DHARMa package

3 讨论

本研究采用两阶段负二项混合效应模型,将固定献血点献血人次的变异分解为时间变动因素与献血点空间随机效应两部分。结果表明,下雨、星期类型、月份、节假日等时间因素对献血人次具有显著影响;同时,不同献血点之间存在明显的随机效应差异,第二阶段引入献血点静态特征后,工作时长和景点数量可部分解释这些差异。

时间相关环境因素方面,本研究发现下雨与献血人次呈负相关(下降 5.69%,P<0.001),与既往研究结果一致[1,13]。降雨主要通过增加居民的出行成本降低其献血意愿;虽然整体降幅有限,但在实际血液采集运营中,血站管理部门可依据精准气象预报动态调整人员配置,或在雨天适时开展线上

预约引导。气温一次项系数为正(P=0.051),二次项系数为负且显著(P=0.036),提示献血人次与气温呈非线性关联。这一发现可为季节性资源配置提供参考:夏季高温和冬季低温时段,可适当调整服务时间或加强线上预约以缓解气温对出行意愿的潜在影响。星期效应显示星期日(+19.50%)和星期六(+15.73%)献血人次高于星期一,提示献血行为与居民时间可支配性相关。节假日献血人次较非节假日增加 16.24%(P<0.001),与毕岐勇等[14]报告的"北京地区法定节假日献血人数是工作日 1.779 倍"结论相一致,进一步支持假期对献血行为的正向影响作用。月份效应呈现"春高夏冬低"的季节性波动:与 1 月相比,2 月(+18.67%)、3 月(+10.07%)献血人次增加,而 7 月(-21.59%)、8 月(-20.92%)、9 月(-14.14%)、10 月(-17.28%)、11 月(-23.44%)、12 月(-17.41%)显著下降。这一格局可能与气温变化、节假日分布及献血宣传活动等多种因素共同作用有关[1]。

第一阶段负二项混合效应模型中,随机截距方差为 0.43,ICC = 0.78,表明在控制时间变动因素后,献血点间的随机效应差异解释了总变异约 78%,随机效应显著(P<0.001)。各献血点的随机效应呈现较大离散:最高的为大行宫献血点(+326.58%),其次为大洋百货献血点(+196.29%)和江苏省人民医院献血点(+161.40%);最低的为麒麟献血点(-55.43%),其次为山西路献血点(-50.83%)和铁心桥献血点(-44.74%)。这一悬殊差异提示,即使充分控制了时间维度的外部因素,献血点自身尚未被纳入模型的结构性特征与献血人次之间存在强烈关联。例如,大行宫和大洋百货献血点地处人流密集区域,而麒麟和铁心桥献血点位于城郊,周边设施相对薄弱,人流稀疏。不同献血点之间随机效应的巨大差别,也反映出单纯依赖时间因素难以完全解释献血人次的空间异质性,所以有必要进一步探索献血点层面的区位特征和服务配置对献血人次的具体贡献。

第二阶段在第一阶段模型基础上引入 7 个献血点静态特征后,模型拟合优度显著提升(AIC 从 27 830.0 降至 27 434.5,似然比检验 P<0.001),随机截距方差从第一阶段的 0.43 降至 0.092,表明这些特征可部分解释献血点间差异。在各项特征中,每日工作时长与献血人次呈最强正关联:每增加 1 个标准差,献血人次预期增加 82.29%。这表明延长献血网点的开放时间能够极大地提高卫生利用服务的可及性,为工作日繁忙的潜在人群提供了情境便利[15]。周边景点数量同样呈显著正关联:每增加 1 个标准差,献血人次预期增加 37.12%。这一结果提示,景点周边人群多处于休闲状态,时间支配自由度较高,其献血意愿与情境便利性相关[5]。相反,医院数量、商超数量、公共交通站点数量、大学数量、住宅数量在模型中均未达到显著水平(P>0.05)。商超、医院和公共交通站点的不显著可能与人群"任务导向型"移动有关,停留意愿低[16];大学的不显著可能是由于当前采供血实践中多采用血站进校园的模式,叠加校园内部的封闭性环境,削弱了学生对周边固定献血点的需求[17];住宅不显著则可能与时间错配相关,居民白天外出工作,献血点开放时间难以覆盖[18]。

一个值得注意的现象是,对比第一阶段与第二阶段的献血点随机效应排名,部分献血点发生显著变化。例如,大洋百货从第一阶段的+196.29%变为第二阶段的负效应,而殷巷从-9.05%升至+41.95%。这种变化反映了模型将可解释的变异从随机效应中剥离的能力:第一阶段中大洋百货的"高效"主要源于其优越的区位特征;当这些特征作为固定效应纳入后,其剩余随机截距反映的是"在控制这些特征后实际献血人次与预测值的偏差"。大洋百货第二阶段变为负值,提示其献血人次低于具有相同区位特征献血点的预期水平,可能与献血点内部管理或周边竞争有关。反之,殷巷在控制特征后实际表现优于预期,提示存在未被测量的正向因素。另一个值得注意的案例是夫子庙献血点,该献血点在第一阶段排名靠后,且夫子庙为南京地标性景点,周边景点数量并不少,然而在模型中,景点数量整体呈现正向关联,而夫子庙个体却表现为"低效"。这一现象并非模型错误或结论矛盾,而是反映了具体献血点的特殊性问题。实地调研及运营数据显示,夫子庙献血点的日均工作时长短于其他高效献血点,且其服务时间主要集中在白天,而夫子庙区域的人流高峰往往出现在晚间及节假日夜间,存在明显的时间错配。此外,该献血点位置相对隐蔽、标识不醒目,共同影响了其献血人次低于预期。因此,夫子庙的反例恰恰说明:景点数量虽是重要影响因素,但如果缺乏对服务时长配置、献血点可见性等局部条件的重视,区位优势将无法有效转化为实际采集效能。

结合上述时间因素与空间异质性的双重发现,采供血机构可采取时空协同的精细化血液募集策

略。一方面,在时间维度上进行动态预测与资源倾斜。鉴于周末与法定节假日流量激增的规律,血站应在高峰时段动态增加一线采血人员、物料流转及后勤保障投入。在低谷时段(如连续阴雨天、冬夏极端气温期),则应通过精细化线上预约、精准手机短信定向推送等数字化手段加强远程动员。另一方面,在空间维度上开展网点优化与分类运行。新建网点的选址评估应彻底改变过往单纯依赖宏观人流量经验判断的局限,综合考虑人群的活动类型(休闲游览型优先于任务通勤型)及驻留特征[10,15]。

综上所述,本研究基于负二项混合效应模型,在控制天气、星期类型及月份等时间变动因素后,量化了南京市 17 个固定献血点间的随机效应差异。尽管本研究由于客观条件限制,分析数据仅涵盖 2025 年单一年份,其时间维度的跨年外推仍需保持审慎,且 1 000 m 测量半径和 17 个固定献血点的二级样本量规模在一定程度上限制了空间效应估计的统计效能与稳定性。但本研究发现献血点运行效率同时受时间因素与固有特征影响,且献血点间存在显著系统性差异,工作时长及附近景点数量与献血点的献血人次相关。这些实证量化结果可为我国各大城市无偿献血网络的献血点空间规划、选址决策优化以及采供血资源的空间精细化调配提供重要的数据支撑与决策参考。

利益冲突说明/Conflict of Interests

所有作者均声明不存在利益冲突。

伦理批准及知情同意/Ethics Approval and Patient Consent

本研究不涉及伦理审查并豁免知情同意。

作者贡献/Authors' Contribution

李张晖:研究方案设计、实验操作、论文撰写、统计分析;梁文飚、蒋昵真:论文审核;胡文佳、陈显、袁文青、蒋昵真:文献查询、数据收集。

[参考文献]

[1] LIN S W, ANISA K N, CHEN Y C. Effects of meteorological factors on blood donation[J]. Transfus Apher Sci, 2020, 59(6):102901.

[2] GARDNER W, MULVEY E P, SHAW E C. Regression analyses of counts and rates: Poisson, overdispersed Poisson, and negative binomial models[J]. Psychol Bull, 1995, 118(3):392-404.

[3] BOLKER B M, BROOKS M E, CLARK C J, et al. Generalized linear mixed models:a practical guide for ecology and evolution[J]. Trends Ecol Evol, 2009, 24(3):127-135.

[4] 赵轶伦, 应上云, 冒丹, 等. 献血点选址建设中宏观区位要素的研究——以南京红十字血液中心为例[J]. 中国输血杂志, 2020, 33(9):994-997.
ZHAO Y L, YING S Y, MAO D, et al. Fixed blood donation site selection: macro-factors on assessing location suitability, a case study of Nanjing Red Cross Blood Center[J]. Chin J Blood Transfusion, 2020, 33(9):994-997.

[5] SCHRÖDER J M, RAMONDT S, SPEKMAN M, et al. From unfulfilled to exceptionally motivated: motivational types, change, and retention of blood and plasma donors[J]. Psychol Health, 2025:1-32.

[6] CHEN R, YIN P, WANG L, et al. Association between ambient temperature and mortality risk and burden: time series study in 272 main Chinese cities[J]. BMJ, 2018, 363:k4306.

[7] CLOUTIER M S, APPARICIO P, DUBÉ J, et al. Regional variation in the modeling of donation frequency: the case of Héma-Québec, Canada[J]. Transfusion, 2012, 52(11):2329-2339.

[8] HAIR J F, TATHAM R L, ANDERSON R E, et al. Multivariate data analysis[M]. 8th ed. London: Pearson, 2018.

[9] LOY A, KOROBOVA J. Bootstrapping clustered data in R using lmeresampler[J]. R J, 2022, 14(4):25-37.

[10] RIGHTS J D, STERBA S K. Quantifying explained variance in multilevel models: an integrative framework for defining R-squared measures[J]. Psychol Methods, 2019, 24(3):309-338.

[11] MCELDUFF F. Negative binomial regression[J]. J R Stat Soc Ser A, 2007, 171(3):758-759.

[12] GELMAN A, HILL J. Data analysis using regression and multilevel/hierarchical models[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

[13] FERGUSON E, LAWRENCE C, BOWEN S, et al. Warming up cool cooperators[J]. Nat Hum Behav, 2023, 7(11):1917-1932.

[14] 毕岐勇, 王志丽, 陈霄. 街头无偿献血人数预测模型的探讨[J]. 中国输血杂志, 2022, 35(4):420-423.
BI Q Y, WANG Z L, CHEN X. Prediction model of the number of street voluntary blood donors[J]. Chin J Blood Transfusion, 2022, 35(4):420-423.

[15] GRIEVE R, WILLIS S, DE CORTE K, et al. Options for possible changes to the blood donation service: health economics modelling[M]. Southampton (UK): NIHR Journals Library, 2018.

[16] 周愉峰, 胡欢庆, 陈良勇. 不确定环境下采血点定位-

资源配置集成决策的鲁棒优化[J]. 运筹与管理, 2024, 33(8):72-78.
ZHOU Y F, HU H Q, CHEN L Y. Robust optimization of location-resource allocation integrated decisionfor blood collection points under uncertain environments [J]. Oper Res Manag Sci, 2024, 33(8):72-78.

[17] 苏丽丽, 李忠, 赵轶伦, 等. 某医学院校学生无偿献血动机及影响因素分析[J]. 中国输血杂志, 2018, 31(5):527-530.
SU L L, LI Z, ZHAO Y L, et al. Analysis of voluntary blood donation motivation and its determinants among students in one medical school[J]. Chin J Blood Transfusion, 2018, 31(5):527-530.

[18] 屠小明. 无偿献血动机评价量表编制及献血行为影响因素研究[D]. 南京:南京医科大学, 2014.
TU X M. Development of evaluation scale for motivation of non-remunerated blood donation and study of influencing factors on donation behavior[D]. Nanjing:Nanjing Medical University, 2014.

[19] 何桂兰. 苏州市中心血站献血屋运行、管理及血液采集情况分析[J]. 中国卫生产业, 2023, 20(17):216-219.
HE G L. Analysison theoperation,management and blood collection of blood donation roomat Suzhou Central Blood station[J]. China Health Industry, 2023, 20(17):216-219.

(2026-04-27 收稿,06-01 修回,06-17 接收)
本文编辑:李宜博

(上接第 902 页)

GUO J F. Study on clinical significance of platelet antibody detection in hematological disease patients with platelet transfusion refractoriness[J]. Zhejiang Chinese Medical University,2022.

[25] 梁若鹄,黄彦,张颖,等. 单采血小板解聚困难原因分析及预防措施探究[J]. 齐齐哈尔医学院学报,2018,39(1):38-39.
LIANG R H,HUANG Y,ZHANG Y, et al. Analysis of causes and exploration of preventive measures for difficult disaggregation of apheresis platelets[J]. Journal of Qiqihar Medical University,2018,39(1):38-39.

[26] 王利华. 血站无偿献血中机采血小板造成冲红原因分析及影响因素研究[J]. 中国当代医药,2021,28(28):72-74,78.
WANG L H. Analysis of causes and influencing factors of red cell contamination in apheresis platelets collected from voluntary blood donors at blood stations[J]. China Mod Med,2021,28(28):72-74,78.

[27] 刘磊. 血小板保存技术的应用研究进展[J]. 解放军医药杂志,2020,32(8):108-111,116.
LIU L. Research progress on the application of platelet preservation technology[J]. Med & Pharm J Chin PLA, 2020,32(8):108-111,116.

(2026-03-06 收稿,06-08 修回,07-18 接收)
本文编辑:李宜蔓