

# Dynamic Strategies for Setting and Arranging Emergency Points in Public Health Incidents

Zhangzhe Liu<sup>†</sup>, Li Jiang, Ang Du

Faculty of Science, Beijing University of Technology, Beijing, 100124, China

Email: liuzhangzhe2@126.com

## Abstract

In the early stages of a public health outbreak, the use of a more efficient and economically efficient number of nucleic acid points has positive implications for the fight against the epidemic. Based on the Haff model, Dijis algorithm and queuing theory, taking Beijing Tiantongyuan community as an example, the optimal scheme of point setting under the current model can be calculated based on the local population data, infrastructure scale and commuting mode. The results of this paper show the theoretical number of carriers and the optimal number of Windows for the nucleic acid test samples as of July 25, 2023. The strategy optimization of the design scheme of nucleic acid test samples can reduce economic costs, have good prevention and control effect, and improve the quality of infectious disease prevention and management.

**Keywords:** Public Health Management; Huff Model; Queuing Theory Model; Quality Prevention and Control

## 公共卫生事件下应急点位设置和安排的动态策略

刘张喆<sup>†</sup>, 蒋励, 杜昂

北京工业大学理学部, 北京 100124

**摘要:** 在公共卫生事件爆发初期, 运用更高效的经济高效的核酸点的窗口数量和点位位置设置策略对于抗击疫情有积极意义。依托哈夫模型, 迪杰特拉斯算法和排队论, 以北京天通苑社区为例, 基于当地各项人口数据、基础设施规模和通勤模式等因素, 可以计算出当前模型下点位设置的最优方案。本文结果给出了截至 2023 年 7 月 25 日的核酸检测样本采集点点位分布的理论承载人数和最优窗口数量设置。核酸检测样本采集点点位设计方案的策略优化, 在公共卫生管理上, 能够降低经济成本, 具有较好的防控效果, 且能提高传染病预防管理的质量。

**关键词:** 中公共卫生管理; 哈夫模型; 排队论模型; 防控质量

## 引言

在持续约三年的新冠疫情防控工作中, 大规模核酸检测样本的采集被有效证明是疫情防控工作的必要措施, 然而, 不合理的点位设置在造成了政府人力物力浪费, 同时影响了居民正常生产生活。本研究从核酸采样点的点位设置出发, 创新性的将哈夫模型、排队论模型和迪杰斯特拉算法, 通过研究疫情传染性、社区分类和人口密度等情况, 基于近三年以来北京天通苑社区已有的核酸点设置方案, 制定出更合理的窗口数量设置和点位设置策略。在保障居民正常生活(以排队时间的长短为参考)、保证公共卫生事件平稳解决(以北京市核酸检测点设置规范为参考)和精简政府人力物力开支(以窗口人数多少为参考)的前提下, 寻找最优策略。研究结果得到了天通苑地区现存的核酸检测样本采集点各点位的最低窗口数、现存的核酸检测样本采集点调整方案 and 对应开放时间。该方法和方案为其他地区或社区在公共卫生事件爆发初期, 尚未特设设施以应对相关事件的情况下, 进行的应急点位设置提供了很好的思路和启发。

# 1 研究背景与意义

面对新发的、未知的新冠病毒，在党中央领导下，全国贯彻“坚定信心、同舟共济、科学防治、精准施策”总要求，取得武汉保卫战、湖北保卫战的决定性成果，有效阻断国内疫情蔓延<sup>[1]</sup>。从 2020 年到 2022 年，政府处理了近百余起聚集性疫情，在接连不断的全球疫情冲击下，始终将感染率和死亡人数控制在全球最低水平，为疫情治理、疫情防护提出中国智慧、中国方案。这一系列成绩凸显了我国应对高度不确定性突发公共卫生事件的制度优势，检验了国家治理体系和治理能力现代化建设成效<sup>[2]</sup>。

通过长期的防控实践经验可以看出,疫情筛查工作能够有效确定感染情况，对于抗疫政策动态调整、控制和遏制疫情传播意义重大。然而，由于不合理的核酸检测样本采集点点位设置，一些地区的核酸筛查工作曾一方面影响了居民的正常生活，扩大了传播风险，另一方面造成了政府人力物力的浪费。如何合理设置应急点位，合理配置人力物力资源，已成为疫情经验教训总结的重要领域。

目前有关核酸检测点配置策略的国内研究主要集中在核酸检测系统优化<sup>[3]</sup>和核酸检测技术发展<sup>[4]</sup>，有关核酸检测样本采集点点位设置问题的研究相对较少。部分学者创新式的将排队论问题与核酸检测样本采集点点位设置问题相结合<sup>[5]</sup>，通过建立多服务台排队论模型，为核酸检测样本采集点最佳服务强度和最优日容量的确定提供理论支撑，为排队论寻找到了全新的应用场景，然而相关研究普遍采用欧几里得距离和行政地区人口作为各核酸检测样本采集点的接纳人数，未充分考虑到应急点位设置问题之于核酸检测样本采集点服务范围的影响和相应接纳能力的要求的不同。

哈夫模型是一种经济模型<sup>[6]</sup>，于 1963 年由美国加利福尼亚大学的经济学者 D.L.Huff 提出，常被用于测算商超服务范围<sup>[7]</sup>。其在点位功能辐射范围的测算能够有效帮助测算核酸检测样本采集点的服务人数。本文意图引进哈夫模型，更准确的估算核酸检测样本采集点的服务范围，进而计算出大型公共卫生事件爆发初期，更为合理的应急窗口开设时间、应急窗口数量设置。

## 2 数据来源与方法介绍

### 2.1 数据来源

人口总数数据来源为 2021 年北京市昌平区第七次全国人口普查公报和 2021 年北京市朝阳区第七次全国人口普查公报。人口密度数据来源 2023 年 8 月 21 号前的北京我爱我家房地产经纪有限公司统计的各小区入住率。核酸检测样本采集点点位分布情况截至 2023 年 7 月 25 日，来源于现场调研。利用以上数据及北京市天通苑社区地图，我们试图得到人口密度图和各核酸点的服务范围图。

### 2.2 研究方法

本文计划采用哈夫模型和排队论理论，基于天通苑社区现存核酸检测样本采集点设置方案，制定出大型公共卫生事件爆发初期，在现存设施条件下，更合理的窗口数量设置和开放时间安排。研究步骤如下：

- ① 通过人口密度数据、现存的核酸检测样本采集点、迪杰斯特拉算法<sup>[8]</sup>和哈夫模型，得出截至 2023 年 7 月 25 日，天通苑各核酸检测点的接待人数和服务范围统计图；
- ② 利用第一步得出的各核酸检测点的接待人数情况，综合排队论，得出最佳应急窗口设置数；
- ③ 通过天通苑地区通勤情况统计，得出天通苑地区应急核酸检测样本采集点的最佳开放时间。

#### 2.2.1 哈夫模型

哈夫概率模型由美国加利福尼亚大学的经济学者 D.L.Huff 于 1963 提出，主要被应用于预测城市区域内饭店、超市等设施的最佳选址等问题<sup>[7]</sup>。到如今，哈夫模型已然经历 40 余年考验，被世界各地的商业、政府分析人士以及学者广泛使用，如江苏省常州市武进区的商业网点规划项目<sup>[9]</sup>和辽宁省物流服务网络布局优化项目<sup>[10]</sup>具有较强可靠性。具体算式如下：

$$P_{IJ} = \frac{\frac{S_J^\mu}{T_{IJ}^\mu}}{\sum_{J=1}^n \frac{S_J^\mu}{T_{IJ}^\mu}}$$

其中， $P_{IJ}$  指 I 地区消费者到 J 商店的购物的概率； $S_J$  指 J 商店的卖场吸引力； $T_{IJ}$  指 I 地区到 J 商店的距离阻力； $\lambda$  和  $\mu$  指以经验为基础估计的常数； $n$  指互相竞争的零售商业中心或商店数。

哈夫模型及其变种在具体应用方面存在三个困难，分别是  $\lambda$  和  $\mu$  的数值估计、距离变量的计算和基于不同地区尺度的参数调整<sup>[11]</sup>，通过对哈夫模型进行适当修改，可以得到各核酸检测样本采集点的服务范围。

### 2.2.2 迪杰斯特拉算法

迪杰斯特拉算法由荷兰计算机科学家 Edsger W. Dijkstra 于 1959 年提出，是从一个顶点到其余各顶点的最短路径算法，普遍用于解决有权图中最短路径问题。迪杰斯特拉算法主要特点是从起始点开始，采用贪心算法的策略，每次遍历距离始点最近且未访问过的顶点的邻接节点，直到扩展到终点为止。该算法可以用于计算哈夫模型距离阻力。

### 2.2.3 排队论

排队论是研究服务系统因需求拥挤而产生等待行列这一现象的数学理论，是运筹学的重要分支<sup>[12]</sup>，如今已广泛应用于计算机网络、生产、运输、库存等各项资源共享的随机服务系统，譬如后疫情时代应急物资调度<sup>[13]</sup>和基于排队论的智能快递柜格口定价策略<sup>[14]</sup>。

排队论模型主要包括顾客到达情况的分布  $X$ 、服务时间的分布  $Y$ 、服务台个数  $Z$ 、系统容量限制  $A$ 、顾客源数目  $B$  和服务规则  $C$  这六个方面。排队系统的主要衡量指标有正在接受服务的顾客数  $L_s$ 、在队列中等待的顾客数  $L_q$ 、系统中顾客总数  $L$ 、顾客在服务中消耗的时间  $W_s$ 、顾客在队列中等待的时间  $W_q$ 、顾客在系统中的总逗留时间  $W$  和服务强度  $\rho$ 。

## 3 模型改进及结果分析

### 3.1 模型改进

#### 3.1.1 哈夫模型的改进

本文主要试图解决核酸检测点的最佳窗口数和最佳开放<sup>[15][16]</sup>，因而需要对哈夫模型进行适当修改，以更好测算核酸检测点的服务范围。这里对哈夫模型(1)具体修改如下：

$$P_{IJ} = \frac{\frac{S_J^\mu}{T_{IJ}^\mu}}{\sum_{J=1}^n \frac{S_J^\mu}{T_{IJ}^\mu}}$$

其中， $P_{IJ}$  指 I 地区居民到 J 核酸点做核酸的概率； $S_J$  指 J 核酸点吸引力； $T_{IJ}$  指 I 地区到 J 核酸点的距离阻力； $\lambda$  和  $\mu$  指以经验为基础估计的常数； $n$  指附近共存的核酸点数。

针对前文提到的第一个问题，即  $\lambda$  和  $\mu$  的数值估计。由于具体区域数据不对外开放，且对区域数据进行回归的难度较大，这里以经验为基础，对常数  $\lambda$  和  $\mu$  依照经验参数，分别设 2 和 1<sup>[17]</sup>。

针对前文提到的第二个问题，即距离变量的计算。为增加精确度，使模型更符合现实条件，本次研究将借助迪杰斯特拉算法，以测算个人到核酸检测样本采集点的网格距离，具体操作方法将借助导航软件。

针对前文提到的第三个问题，即尺度不同造成的模型误差。由于研究区域天通苑范围较小，道路通畅，可一定程度上予以忽略。

### 3.1.2 排队论模型设置

采用排队论模型时，我们假设如下：

- ① 顾客的到达情况  $X$  服从泊松分布；
- ② 服务时间的分布  $Y$  遵循确定制，具体服务时间为 30s/人；
- ③ 系统容量不设上限；
- ④ 顾客源数目  $B$  参考当地人口密度图和经哈夫模型统计出的核酸检测点服务范围统计图；
- ⑤ 服务规则服从先到先得的原则；
- ⑥ 约束条件限制以北京市发布的《新型冠状病毒核酸检测样本采集点管理规范》为准。

### 3.2 结果分析

2021 年 11 月 1 日，天通苑地区人口规模分布图如下。图中灰点指代天通苑地区现存的 11 个核酸检测样本采集点。其中，11 号点位位于天通苑社区外侧，因其辐射范围与天通苑地区存在重合，所以将之纳入天通苑地区核酸检测样本采集点范畴。各点位根据该点位所需的窗口数量的不同，从少到多，按照 0-5；6-10；11-15 的分类标准进行分类，并反应在图中，灰点尺寸依照上述分类被分为小中大三类，以便于区分。

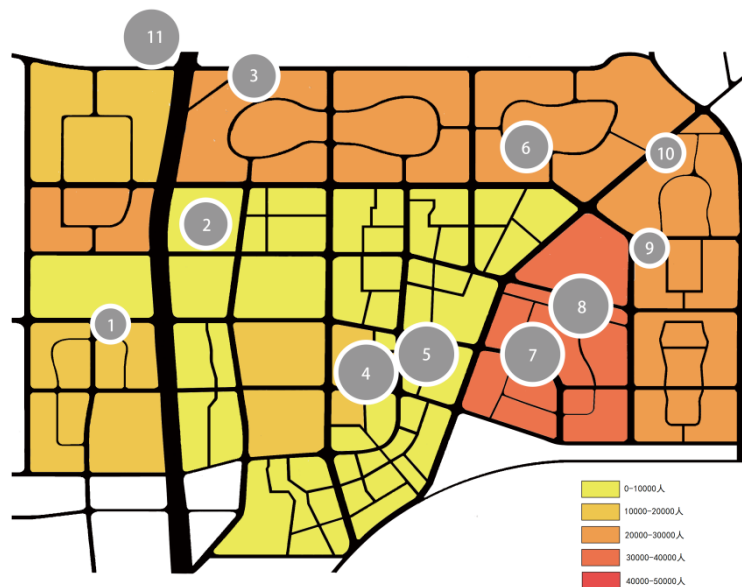


图 1 天通苑地区人口规模图及现存核酸检测样本采集点点位图

我们对 11 个点位进行分类，依照核酸检测样本采集点的区位条件不同，将核酸检测点分为 3 类。第一类包括 1 号、2 号、3 号、9 号和 10 号共五个点位，第二类包括 4 号、7 号和 8 号共 3 位，第三类包括 5 号、6 号、11 号共 3 个点位。其中，第一类均为小型医院，周边居民区人口数量较少，承载能力有限。第二类为大型医院，吸引力更强，占地面积较大，承载能力较强。第三类为北京市政府特设的核酸检测点位，多为空旷地带，周边居民区人口数量较多，核酸检测压力较大，基础设施完善。我们选取 2 号、8 号和 5 号作为每一类的代表以进一步说明相关情况。

如上文所述，通过哈夫模型对 2 号核酸检测样本采集点进行分析，可以得到该点位的服务范围，如图 2 所示，再结合天通苑地区人口规模分布情况，即可得出该点位的预计承载人数，再结合设置好的各核酸检测样本采集点的服务效率，即 30s/人，运用 MATLAB 软件，通过排队论模型即可得出该地区的最佳窗口数和最佳开放时间。具体结果详见下文。

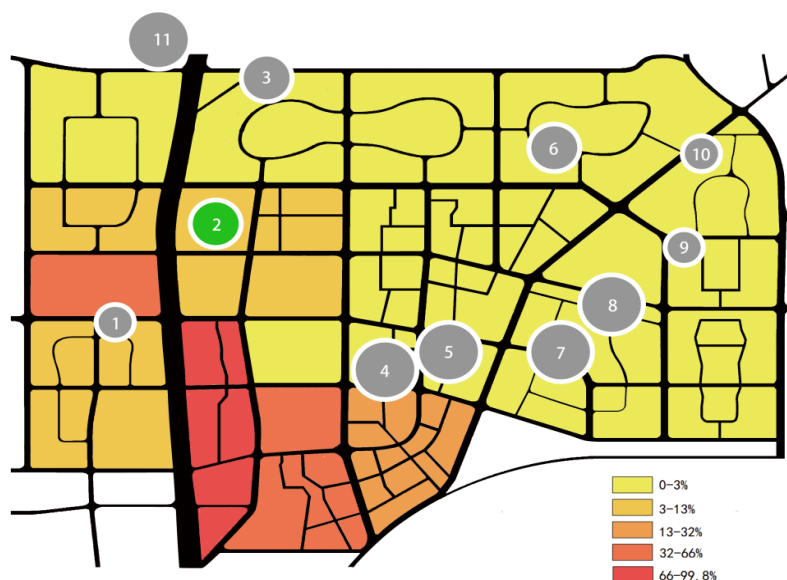


图 2 2 号核酸检测样本采集点服务范围

根据计算可知，以三天一检计算，该点位单日须接待约 7030 人，为满足北京市发布的《新型冠状病毒核酸检测样本采集点管理规范》，该点位需 8 个窗口以满足接待需求，此时单窗口平均排队人数约 8 人、系统平均排队人数约 15 人、单人平均逗留时间约 1.05 分钟、平均排队时间约 0.55 分钟。

根据计算可知，以三天一检计算，该点位单日须接待约 7030 人，为满足北京市发布的《新型冠状病毒核酸检测样本采集点管理规范》，该点位需 8 个窗口以满足接待需求，此时单窗口平均排队人数约 8 人、系统平均排队人数约 15 人、单人平均逗留时间约 1.05 分钟、平均排队时间约 0.55 分钟。

该点位为天通苑地区小型医院，尽管临近主干道，交通便利，但由于周边居民区居住率较低和医院较小，核酸检测任务较轻。为扩大医院区位优势，可以采取 24 小时开放策略，以实现人流疏散，增多应急方案选择。

如上文所述，通过哈夫模型对 8 号核酸检测样本采集点进行分析，可以得到该点位服务范围，如图 3 所示，再结合天通苑地区人口规模分布情况，即可得出该点位的预计承载人数，并根据设置好的各核酸检测样本采集点的服务效率，即 30s/人，运用 MATLAB 软件，通过排队论得出该地区的最佳窗口数和最佳开放时间。相关具体数据详见下文。

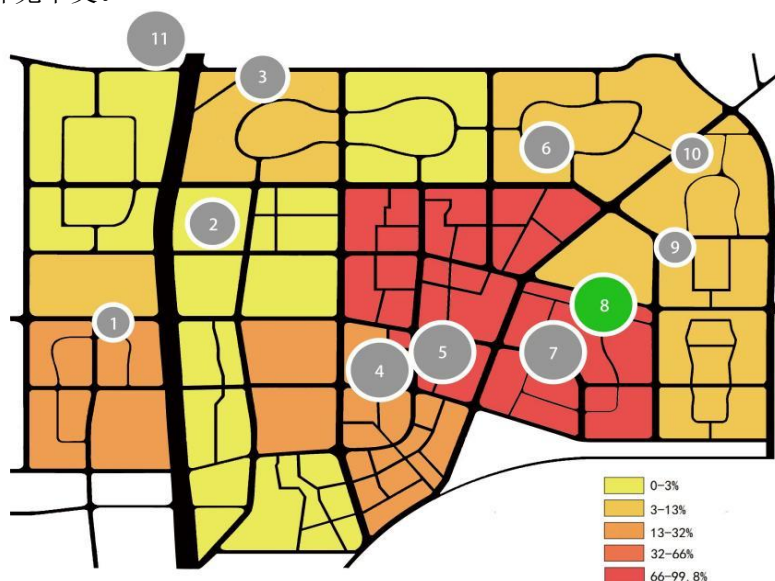


图 3 8 号核酸检测样本采集点服务范围

根据计算可知，以三天一检计算，该点位单日须接待约 14854 人，为满足北京市发布的《新型冠状病毒核酸检测样本采集点管理规范》，该点位需 16 个窗口以满足接待需求，此时单窗口平均排队人数约 25 人、系统平均排队人数约 41 人、单人平均逗留时间约 1.31 分钟、平均排队时间约 0.81 分钟。

该点位于天通苑核心区域，紧邻道路，交通便利，辐射范围较广，且作为大型医院，吸引力较强，加之四周均为居民区，接待人数较多。为实现人口疏解，一方面应增设应急窗口，另一方面应充分发挥医院区位优势，延长窗口开放时间。

同时，从图 2 与图 3 的对比中可以看出，尽管两点同为医院，且都紧邻道路，交通便利，但 2 号点受限于医院规模和周边居民区的居民数量，接待能力有限，核酸检测样本采集任务承载能力较低，而 8 号点因行政等级较高，吸引力较强，单日接待人数为 2 号点两倍。综上，尽管二者同属医院，但就窗口设置策略上，应采取不同的设置策略。

通过哈夫模型对 5 号核酸检测样本采集点进行分析，可以得到该点位的服务范围，如图 4 所示，再结合天通苑地区人口规模分布情况，即可得出该点位的预计承载人数，再结合设好的各核酸检测样本采集点的服务效率，即 30s/人，运用 MATLAB 软件，通过排队论得出该地区的最佳窗口数和最佳开放时间。

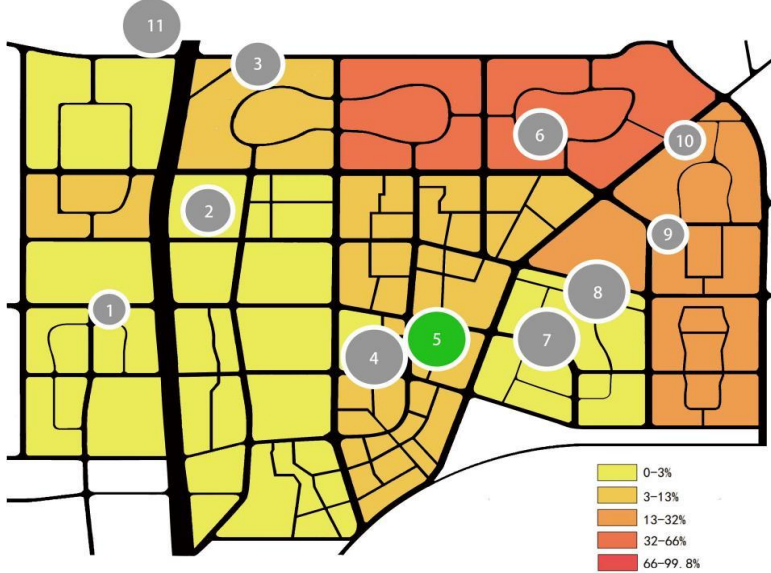


图 4 5 号核酸检测样本采集点服务范围

根据计算可知，以三天一检计算，该点位单日须接待约 10124 人，为满足北京市发布的《新型冠状病毒核酸检测样本采集点管理规范》，该点位需 11 个窗口以满足接待需求，此时单窗口平均排队人数约 20 人、系统平均排队人数约 31 人、单人平均逗留时间约 1.44 分钟、平均排队时间约 0.94 分钟。

该点位于天通苑核心地区，设置目的为分担 4 号、7 号的核酸检测压力，周边居民区人口众多，加之交通便利，因而接待人数较多。尽管该点位为特设核酸检测点，开设时间有限，但得益于该点周边较为空旷，可通过增设点位以缓解接待压力。

从图 2 与图 4 的对比中可以看出，得益于临时核酸检测样本采集点点位设置灵活的优点，疫情期间相关点位极大地缓解了医院部门的核酸检测压力，满足了周边居民的核酸检测需求，保障了居民的正常生产生活。如再次遇到此类大型公共卫生事件，应充分发挥临时核酸检测样本采集点的灵活调配能力，考虑小幅增设类似点位。

下表为 11 个点位经哈夫模型和排队论计算出的各点位预计承载人数、排队等待人数、系统平均人数、平均逗留时间和平均等待时间的具体数据。此外，由于天通苑地区为典型混合型社区<sup>[18]</sup>，青壮年劳动力占整体居民比例较高，通勤压力较大<sup>[19]</sup>，因而开放时间应普遍设定为 7:00-10:00 及 17:00-21:00。



表 1 11 个点位最低窗口设置数及相关衡量指标

三天一检总承载力	S	排队等待人数	系统平均人数	平均逗留时间	平均等待时间
2957	4	2	5	0.8	0.3
7030	8	8	15	1.05	0.55
5602	6	32	38	3.27	2.77
9584	10	150	201	10.32	10.82
10124	11	20	31	1.44	0.94
7812	9	7	15	0.91	0.41
12069	13	26	38	1.52	1.02
14854	16	25	41	1.31	0.81
1513	2	3	4	1.34	0.84
1319	2	1	3	0.95	0.45
12603	14	11	25	0.93	0.43

## 4 结论

本文针对核酸检测样本采集点点位设置问题,综合哈夫模型、排队论模型和迪杰斯特拉算法,通过测算核酸检测样本采集点的有效服务范围、设置核酸检测样本采集点的排队模式,为在公共卫生事件爆发初期的应急点位设置问题打开了很好的思路,提供了有效方法。本次研究以北京市天通苑社区为例,统计了现存的 11 个核酸检测样本采集点,并为各点位设计了较为合理的窗口开放数量和窗口开放时间,以及该套方案下各点位的模拟排队情况。该方案创新地引进哈夫模型作为估算核酸检测样本采集点服务范围的模型,通过迪杰斯特拉算法计算真实距离阻力,并将排队论用于测算核酸检测样本采集点的排队情况中。

为有效确定较为合理的大型公共卫生事件下应急点位的设置问题提供思路。同时,本文还有一些不足尚未考虑其中,譬如在使用哈夫模型时未对区域数据进行回归处理,而是采用了经验参数;在使用排队论模型时未考虑到服务强度  $\rho$  和部分人群三天多检的情况,且排队规则未采用更符合现实情况的混合制;研究样本社区类型较为单一,在不同社区中的适配度不同。针对这些问题,我们将在今后的研究中继续深入开展,并尝试通过引进区域数据回归处理、扩充排队论模型处理参数和增加样本数等方法予以解决。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国国务院办公厅.抗击新冠肺炎疫情的中国行动[M].北京:人民出版社,2020:3.
- [2] 政武经.应对疫情大考实现有效治理的经验与启示[J].中国行政管理,2021(7):147-148.
- [3] 李鑫,尚林东,陈福原等.一种基于微流控技术的等温核酸即时检测系统.[J/OL]中国测试:1-12[2023-09-04].
- [4] 董宏杰.新型冠状病毒核酸检测技术研究[D].山东大学,2022.
- [5] 凌婷婷,丁伯伦,段双双.基于排队论的全员核酸检测点优化设置[J].太原学院学报(自然科学版),2022,40(01):65-68.
- [6] Liang Z. Traditional Supermarket Store Location Factors from the Perspective of Channel Convenience—Empirical Analysis based on Improved Huff Model[J]. Journal of Global Economy, Business and Finance,2022,4(10).
- [7] 王艳东,豆明宣,刘森保等.基于社交媒体的商业区选址研究[J].地理空间信息,2018,16(06):8-10+20+7.
- [8] Jason, Melvin S, Alvin V, et al. Dijkstra's algorithm to find the nearest vaccine location[J]. Procedia Computer Science,2023,216.
- [9] 李永浮,潘浩之,田莉等.哈夫模型的修正及其在城市商业网点规划中应用——以江苏省常州市为例[J].干旱区地理,2014,37(04):802-811.
- [10] 路世昌,张洲.辽宁省物流服务网络布局优化研究 [J].资源开发与市场,2014,30(06):652-655+726.
- [11] PanH, Li Y, Dang A. Application of network Huff model for commercial network planning at suburban – Taking Wujin district, Changzhou as a case[J]. Annals of GIS,2013,19(3).
- [12] 刘俊杰,孙钦莹.后疫情时代应急物资调度排队模型优化研究[J].物流科技,2023,46(05):13-16+31.
- [13] 张力波,葛禄璐,王赫鑫.基于排队论的智能快递柜格口定价策略[J].工业工程,2022,25(01):152-159.

- [14] 中国运筹学发展研究报告[J].运筹学学报,2012,16(03):1-48.
- [15] PanH, Li Y, Dang A. Application of network Liang Z. Traditional Supermarket Store Location Factors from the Perspective of Channel Convenience—Empirical Analysis based on Improved Huff Model[J]. Journal of Global Economy, Business and Finance,2022,4(10).
- [16] Geoinformation; University of Tsukuba Researchers Describe Findings in Geoinformation (Optimal Location Analysis of Delivery Parcel-Pickup Points Using AHP and Network Huff Model: A Case Study of Shiweitang Sub-District in Guangzhou City, China) [J]. Politics & Government Week,2020.
- [17] Huff model for commercial network planning at suburban – Taking Wujin district, Changzhou as a case[J]. Annals of GIS,2013,19(3).
- [18] 冯猛.特大城市社区分类治理：理论框架与实践应用[J].福建论坛(人文社会科学版),2020(11):171-180.
- [19] 文婧,王星,连欣.北京市居民通勤特征研究—基于千余份问卷调查的分析[J].人文地理,2012,27(05):62-68.