

# 通勤视角下的居家办公防疫策略

朱 玮, 陈 薪, 王嘉欣

(同济大学 高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 模拟比较若干居家办公策略对遏制传染病在都市区中传播的作用, 为后疫情时期的防疫策略制定提供理论支撑。以上海为例, 基于手机数据反映的职住与通勤现状, 用多代理人模拟方法模拟病毒的传播, 从整体-群体-个体层面探讨不同居家办公策略对传播的影响。发现随着居家办公人数比例增加, 传播减弱, 感染人群中青年人的比例减少, 老年人的比例增加。个人通勤距离越远、家离市中心越近、工作地离病源点越近, 越可能成为易感者和易播者。远距离通勤者对传播的影响最大。按距离选择居家办公人员比随机选择能更高效地遏制传播。

**关键词:** 病毒传播; 居家办公; 通勤; 多代理人模拟; 手机数据

中图分类号: R184

文献标志码: A

## Home-Office Strategies for Pandemic Intervention from the Perspective of Commuting

ZHU Wei, CHEN Xin, WANG Jiaxin

(Key Laboratory of Ecology and Energy-saving Study of Dense Habitat of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092)

**Abstract:** This paper aims to compare the effects of several home-office strategies to mitigate spreads of infectious diseases in metropolises using simulation approaches, in order to support formulations of pandemic interventions in the post-pandemic period. Taking Shanghai as an example, and based on the current situation of work, residence, and commuting reflected by the mobile phone data, a multi-agent simulation is conducted to simulate the spread of virus across the region. Besides, the influences of several home-office strategies are discussed from the macro, meso, and micro levels. It is found that as the proportion of the home-office population increases, the spread is weakened, the

proportions of young people in the infected population decrease, and the proportions of the elderly increase. The farther the personal commuting distance, the closer the home is to the city center, and the closer the work place is to the disease source, the more likely is an individual susceptible and infectious. Long distance commuters have the greatest impact on the spread. Choosing home-office workers based on commuting distance can mitigate the spread more efficiently than random selection.

**Key words:** virus spread; home office; commuting; multi-agent simulation; mobile phone data

2020年初的新型冠状病毒疫情极大地改变了中国人的生产生活方式。为了降低人员流动带来的传播风险, 居家办公、就学(home office, HO)被大范围的严格执行, 这一生活方式对控制疫情起到了重要的作用。我国目前已经进入“后疫情时期”, 尽管生产生活逐步恢复, 但却因为对疫情反弹的顾忌而无法达到疫情前的状态, 采取更加灵活且有效的管控策略将是未来的新常态。

防疫学研究显示, 一方面通勤<sup>[1-6]</sup>和空间交互<sup>[7-9]</sup>是传染病传播的显著风险因素; 另一方面针对特定人群或地区的某些防疫策略要比随机选择实施对象更加高效, 包括给就学儿童<sup>[10]</sup>、通勤者<sup>[11]</sup>, 尤其是长距离通勤者<sup>[12]</sup>接种疫苗, 保持儿童青少年的社交距离<sup>[13]</sup>, 在高连接性的地区实施干预<sup>[7]</sup>。就居家办公而言, 从其作为调节人员流动(通勤)和聚集(集中办公、就学)的手段来看, 应该采用怎样的策略来一定程度恢复正常生活, 同时又能否有效地遏制病毒传播, 尚无相关研究和答案。

本研究的目的是为后疫情时期采取居家办公策略提供理论支撑和方向性的建议。之所以是方向性的, 因为病毒在城市中的传播是一个受到众多要素

收稿日期: 2020-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(41771168); 高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室开放课题(2020010202)

第一作者: 朱 玮(1978—), 男, 副教授, 博士生导师, 城市规划学博士, 主要研究方向为城乡规划方法与技术。

E-mail: weizhu@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

影响的复杂过程<sup>[14]</sup>,对传播机制的准确把握仍相当困难且不足,同时策略的综合效应也很难评价,因而基于个体的模拟方法多被采用<sup>[8, 10, 15]</sup>。为了在模拟中再现真实的人员流动与交互,一般研究采用出行调查数据<sup>[3, 5, 12, 16-18]</sup>,有少量研究用省级尺度的手机数据<sup>[19]</sup>,模拟方法大多采用系统动力学框架,设定不同类型或空间中的人群间发生量的转换规则;但很少有研究明确地表达个人行为 and 人际交互在时间和空间中的动态<sup>[17, 20]</sup>。本研究的目标是揭示某些居家办公策略与病毒传播之间的基本的规律性关系,比较备选策略的效应,使得策略选择的方向大体正确,或更加高效。这些备选策略一方面关于“多少人应居家办公”,显示不同程度的通勤与传播的关系;另一方面关于“谁应居家办公”,即如何确定居家办公的对象,具体对比“随机策略”和“通勤距离策略”的对应效果。研究以上海市为例,基于手机数据反映现状职住关系,采用多代理人模拟的方法开展情景模拟。

## 1 方法和数据

### 1.1 模拟模型

以目标导向和简洁为原则<sup>[14]</sup>,模型采用 NetLogo 多代理人模拟(multi-agent simulation)软件实现,对现实的病毒传播机制作了高度简化,为的是聚焦居家办公对传播影响的基本规律,以及兼顾操作上的可行性,并不追求高拟真性。

模型模拟  $N$  个人在一定空间范围中的基本生活行为(居家、通勤、工作),用  $n$  表示单个人,其通勤距离  $D_n$  为居住地和通勤目的地之间的直线距离。通勤时耗  $T_n$  依据 Small 等<sup>[21]</sup>的公式推算:  $T_n = 7.31 + 1.64D_n - 0.00255D_n^2$  ( $R^2 = 0.97$ ),式中距离单位为英里,时间单位为分钟。设正常的上班时间为 9:00,将其减去通勤时耗推算从家出发的时间;工作时长固定为 8 h。模拟从第一天 0:00 开始(图 1),以一定的时间单位  $\epsilon$  推演,对每个代理人逐次模拟居家—出发—工作—返家—居家的过程。

在模拟一开始,设定  $M$  个病患。在每个回合(时间单位)中,当病患与常人接触,该常人以  $P$  的概率被感染。接触在此定义为病患与常人处于同一个空间单元,此处即一个栅格。感染概率  $P$  在实际中受到诸多因素的影响(如病毒传染性、恢复率、管控力度等),在本模拟中还受到空间单元大小的影响(空间单元越大,病患与常人接触的可能性就越高)。与

实际接近的  $P$  很难把握,不过在这里并不非常重要:设定一个相对于模拟场景来说,在计算成本上可以接受的值即可,因为考察的是居家办公对传播的作用,感染概率的大小仅影响模拟的时间跨度。病毒据此机制在人群中传播,当病患占总人数的比例达到 90% 时,模拟停止。

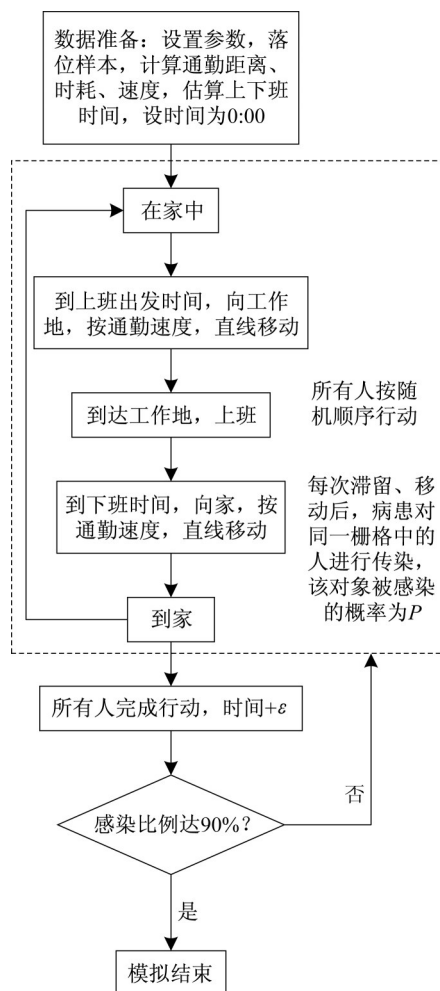


图 1 模拟流程图

Fig. 1 Flowchart of simulation

以上模拟在对应不同居家办公策略的情景下开展。首先是“人数策略”,在居家办公的人数比例  $R \in [0, 0.9]$  中以 0.1 为间隔选取若干比例加以测试,  $R=0$  表示所有人正常出行上班,  $R>0$  表示有相应比例的人居家办公。在确定人数后,进一步检验两种“人选策略”:一是“随机 HO”,即从样本中随机选取该数量的人在家办公;二是“距离 HO”,即选取通勤距离最远的该数量的人居家办公,设计该策略是考虑到流动性与通勤距离正相关<sup>[22]</sup>,限制长距离通勤可能更高效地遏制传播。

### 1.2 数据

本研究首次在都市区尺度以较高的精度模拟个人通勤,具体采用基于中国联通手机信令数据的智慧足迹核心洞察平台输出结果(smart steps core insight platform output)。采用的数据集记录了2017年整个9月上海市域范围内1 345万联通手机用户每天的出行起讫位置,根据每个用户该月的行为特征推断其居住地和工作地点位置。这里特指的“工作地”不仅包括用户的工作地点,也包括没有工作的学生和老人的惯常出行目的地,如学校、公园、医院等。

从本数据集中,提取年龄不小于19岁,记录行为天数不少于28 d的用户作为常住居民,共100余万人。考虑到模拟的可操作性,从中随机抽取了 $N=2$ 万人的子样本进行模拟;经测试,基于此样本量下的通勤特征与大样本非常接近。在市域范围内选取了9个病源点,作为模拟传播的起点,分别是市中心人民广场,处于中心城区边界的虹桥枢纽和张江,作为近郊城镇的嘉定、宝山、松江,以及位于远郊的浦东机场、金山、临港;病源点的初始病患数 $M=2$ 人;模拟的空间精度为每个栅格的长与宽相当于实际的523 m;时间精度为 $\epsilon=2$  min。将每个居家办公策略下每个病源点的情景模拟20次(总计为 $10 \times 2 \times 9 \times 20=3\ 600$ 次),得到相对稳健的结果进行分析。

### 1.3 个体感染与传播特征模型

易感者模型用个体被感染的时间早晚表征个体的易感程度。筛选出模拟结束时已被感染的人作为样本,以被感染时间为因变量,建立以下对数线性模型:

$$\ln T_n = \alpha + \sum_j \beta_j d_{nj} \quad (1)$$

式中: $T_n$ 为个人 $n$ 被感染疾病的时间; $\alpha$ 为常数; $d_{nj}$ 为若干距离因素; $\beta_j$ 为 $d_{nj}$ 的参数,表征因素的影响力。

易播者模型用个体传染他人的数量来表征个体的传播性。筛选出模拟结束时已被感染的人作为样本,以其传染的人数为因变量,对应不同的HO人数比例分别建立模型。由于传染人数是计数变量,因此用以下泊松回归模型:

$$P(Y=y_n) = \frac{\theta_n^{y_n} \exp(-\theta_n)}{y_n!} \quad (2)$$

$$\ln \theta_n = \alpha + \sum_j \beta_j d_{nj}$$

式中: $P(Y=y_n)$ 为个人 $n$ 传染人数为 $y_n$ 的概率; $\theta_n$ 为个体传染人数的均值。

## 2 传播的时空特征

### 2.1 时间特征

图2以人民广场病源点为例,显示了在两种HO人选策略下,时间与人口感染比例的对应关系,每条曲线代表一定HO人数比例。曲线大体呈S形,初期传播较慢,中期迅速增长,后期逐渐放缓。曲线还呈明显的阶梯状,究其成因,感染人口骤增的时间点都处于上下班时段;这说明,通勤时段传播最快,因为相比静止在家或者在工作地附近,人们在流动中接触到不同人的可能性更高,这其中包括病患。病源点位置对传播速率有影响:接近市中心,或位于重要交通枢纽的病源点,如人民广场、张江、宝山、嘉定、虹桥枢纽、浦东机场,其疫情爆发时间早于远离市中心的病源点,如松江、金山、临港。HO明显影响传播速度,HO人数比例越高,曲线越平缓,说明传播的速度越慢;且病源点越偏远,效果越明显。两种HO人选策略对传播速度的影响差异显著,在相同的HO人数比例下,距离HO更有利于遏制传播,可见远离通勤者是传播的重要因素。

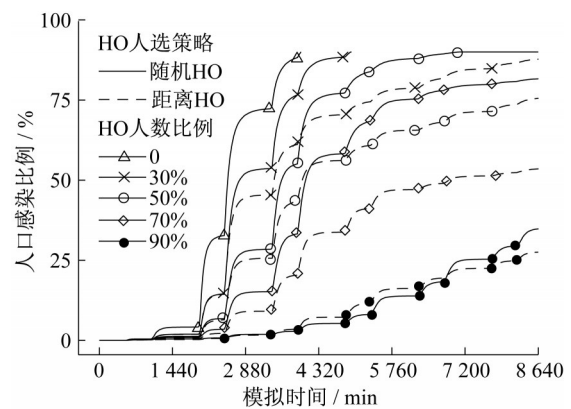


图2 人民广场病源点在不同HO人选策略和不同HO人数比例下的人口感染比例演化

Fig. 2 Evolution of infection ratio at the source of the disease in People's Square in different HO candidate strategies and at different HO population ratios

### 2.2 空间特征

这里考察被感染个体的感染地点分布规律。感染地点与病源点的距离是一方面,另一方面是与市中心(人民广场)的距离,因为市中心的就业和居住人口密度高,向心通勤的模式明显,对传播影响大。图3以宝山病源点为例,显示人口感染比例为20%、 $R=0$ 条件下,感染地点与病源点和市中心距离的分

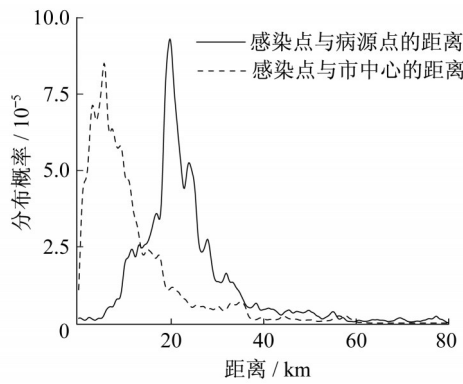


图3 人口感染比例为20%、 $R=0$ 时的感染地点分布(宝山病源点)

Fig. 3 Distributions of infection sites at an infection ratio of 20% and  $R=0$  (at disease source of Baoshan District)

布。可见总体上感染地点更接近市中心,但密度最高的位于距离人民广场5 km的圈层。

不同HO人数比例下,距离市中心和病源点的平均距离和标准差(分散程度)如图4所示,图中数字为HO人数比例,%。由图4可见,距离HO比随机HO更能遏制病毒的空间传播范围。仍以宝山病源点为例(图4),在相同的感染率下,距离HO的平均距离和标准差总体上都小于随机HO,说明感染地点分布更加集中。在中低水平的总体感染率时,距离HO的比例越大,感染地点与市中心和病源点的距离均值和标准差都明显减小,而按随机HO的变化无明显规律,因为随机HO未改变通勤距离的分布,尽管长距离通勤者的数量减少,仍有相当比例存在,他们仍能病毒传播至远处。

2.3 人群感染比例

图5显示在3个典型的病源点下,两种人选策略下均是居家办公人群的感染比例更小,而距离HO

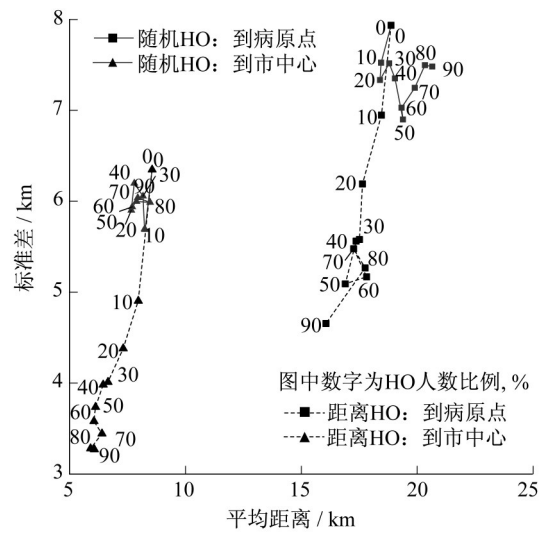


图4 感染地点与市中心和病源点的平均距离与标准差(宝山病源点,感染率=5%)

Fig. 4 Means and standard deviations of distances between infection sites, city center, and disease source (at disease source of Baoshan District and an infection ratio of 5%)

比随机HO明显地降低了居家办公人群的感染率。因为在距离HO下,远距离通勤者优先居家办公,因此在郊区居家办公的人口比例要比随机HO时高;反过来说,随机HO时的居家办公人群更多住在人口密度和人口流动性较高的市中心,且由于远距离通勤者的比例并未显著减小,因此他们被感染的风险比较高。对于外出办公人群来说,在较低的HO人数比例下,两种方式的差异不大;当HO人数比例达到50%以上时,按距离HO的方式开始显著减少他们的感染率,说明需要控制足够数量的长距离通勤者,才能有效减少通勤时的高流动性导致的传播。

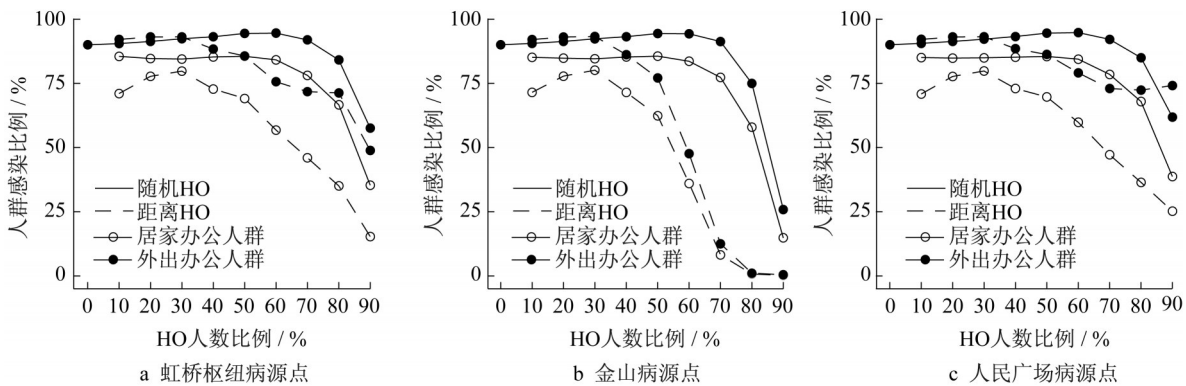


图5 HO人选策略下的居家和外出办公人群感染比例

Fig. 5 Infection ratios between workers working at home and in office in HO candidate strategy

图6显示了不同HO人选策略下,各感染阶段感染人群的年龄段分布情况。传播前期,感染人群中青年人占比高于青年人口占总人口比例,随着HO人数比例的增加,感染人群中老年人的占比增加;距离HO策略下,感染人群中青年人的占比显著减少;中年人的占比始终较为平稳。这是因为较大比例的青年人住在外围地区,通勤距离较长,流动性更强,所以被感染的风险较高;而距离HO相对随机HO显

著地增加了青年人的居家办公,相应降低了他们的感染风险。HO使得人员流动性减小,人员活动密度影响传播的作用渐强,而由于老年人较多居住在高密度中心城区,且他们受距离HO的惠及程度低,所以导致在整体被感染人数减少的趋势下,他们占其中的比例相对变高;中年人的职住空间特征位于青年人和老年人之间,因此在感染人群中的比例变化最不明显。

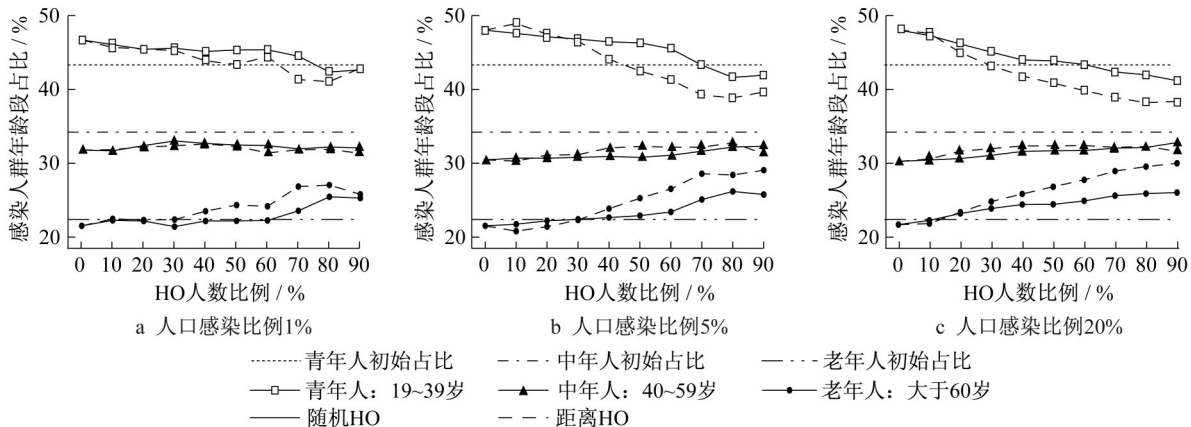


图6 HO人选策略下,典型感染阶段感染人群的各年龄段占比

Fig. 6 Proportions of age groups in infected population in HO candidate strategy

### 3 个体的感染与传播特征

进一步研究易感者以及易播者,揭示影响个人感染和传染的一般规律。在预设的5个因素中,由于随着HO人数比例的增加,家到市中心距离与工作地到市中心距离高度相关,家到病源点距离与工作地到病源点距离高度相关,因此最终考虑3个因素:通勤距离、家到市中心距离、工作地到病源点距离。

#### 3.1 易感者

利用式(1)构建不同HO策略下的易感者模型,其调整  $R^2$  在 0.06~0.40 之间,如图7所示。随着HO人数比例增加,常数项略有增加,说明居家办公策略能够推迟平均感染时间。对于距离因素,总体上家到市中心距离越远,通勤距离越短,工作地到病源点距离越远,感染时间越晚。随着HO人数比例增加,随机HO策略下的参数变化都不明显,这是因为通勤距离结构未发生本质变化;而在距离HO策略下,通勤距离系数的绝对值明显增加,表明其提早感染时间的作用加剧,这是由于远距离通勤人口减少,拉开了远距离通勤者与近距离通勤者的风险水

平。同理,在HO人数比例较小时,家到市中心距离的影响先加强;而随着HO人数比例增加,病毒主要在病源点附近深度传播,与家到市中心距离的关系不大,因此影响减弱。

#### 4.2 易播者

利用式(2)构建不同HO策略下的易播者模型,其平均预测准确率在 0.2~0.9 之间,随HO人数比例递增。模型参数(图8)显示,常数项所代表的平均传染人数随HO人数比例先减后增,这是因为在HO人数比例较大时,较少的被感染者成为少数传播者,人均传染人数反而变高了;这一变化在距离HO策略时更加显著,且拐点处的HO人数比例更小,说明其对传播力有更显著的遏制作用。通勤距离越远,家到市中心距离越近,工作地到病源点距离越近,传染人数越多;其中通勤距离的影响最大,工作地到病源点的影响依然最小。距离要素的影响力均随HO人数比例递增,且在距离HO策略下增加幅度更大,因为减少远距离通勤者可以凸显距离对易感性的作用,一方面增加了不同距离通勤者成为传播者的可能性的差异,另一方面由于减少了具有高传播性的远距离通勤者,相对增加了其他人的传播可能性。

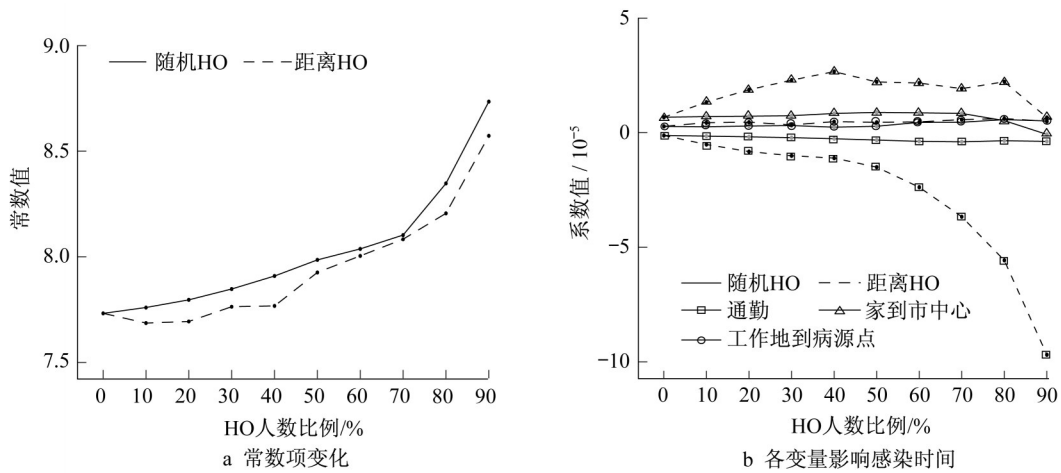


图 7 感染时间模型参数

Fig. 7 Parameters of infection time model

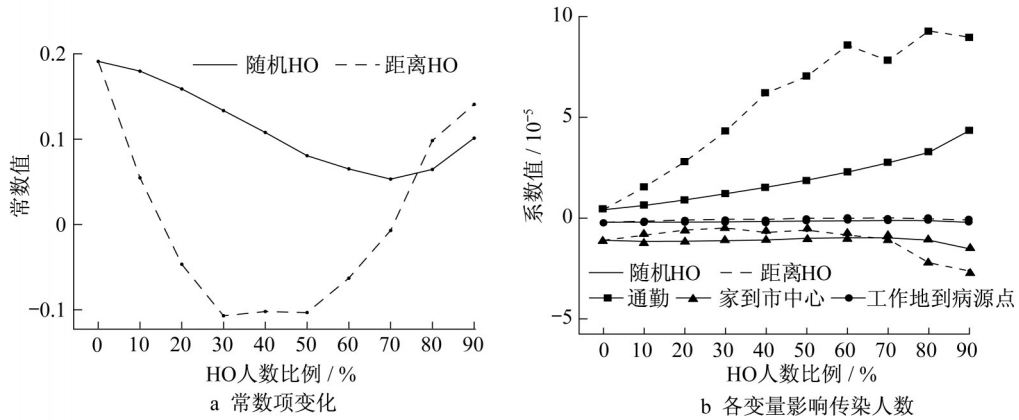


图 8 传染人数模型参数

Fig. 8 Parameters of transmission model

### 4 结论

本文以上海为例,基于手机数据反映的职住与通勤现状,用多代理人模拟方法揭示特定居家办公策略与传染病传播的基本规律。发现人口感染比例随时间大体呈S形曲线发展,局部呈阶梯状,通勤时段感染人口增长最快,接近市中心或位于重要交通枢纽的病源点的病毒传播快于远离市中心的病源点。通勤导致的人口流动性是传播的主因,体现在传播时间上,加大HO人数比例可以显著地延缓传播,且按距离HO比按随机HO的延缓效应更明显。传播空间上,市中心始终是人们感染的较高风险地区;距离HO策略使得感染空间更加集中。传播人群上,居家办公的人更加安全,距离HO对安全性的提高更多一些,也能明显减少外出办公人群的感染比例;提高HO人数比例会减少感染人群中青年人的比例,同时增加老年人的比例,该变化的程度也是

在距离HO策略下更显著。对个人而言,通勤距离越远,家离市中心越近,工作地距病源点越近,越可能成为易感者和易播者;其中通勤距离的影响最大,且随着HO人数比例的增加而扩大,扩大的程度采用距离HO策略明显超过采用随机HO策略。

研究结果对疫情防控实践的直接启示就是,控制人员流动性的关键在于尽量让远距离通勤者居家办公;因距离HO策略比随机HO策略更加高效,可以允许更少的HO人数,对复工复产的影响也就较小。对市中心居住者和工作者需要多加防护和防范,特别是老年人。

既有研究表明,针对特定人群的防疫措施往往更加高效,本文的结论与之一致,并从通勤视角加以补充完善。本文的另一贡献是利用手机数据进行都市区层面的传染病人际传播模拟,提供了较为真实的本底环境。尽管模拟模型的机制简单,但其稳健的特性足以反映基本的规律,并提供通勤管控的工

作方向。研究的主要不足之处在于仅模拟了常住人口的基本生活行为,未考虑流动人口;流动人口的行为不确定性无论对于模拟还是现实防疫管控都是难点,将是下一步研究需要重点解决的问题。

#### 作者贡献说明:

朱 玮:提出研究思路,设计研究内容和方法,采集数据,论文最终版本修订。

陈 薪:数据分析,图表绘制,论文起草。

王嘉欣:数据分析,图表绘制,论文起草。

#### 参考文献:

- [1] COLIZZA V, BARRAT A, BARTHELEMY M, *et al.* The role of the airline transportation network in the prediction and predictability of global epidemics[J]. PNAS, 2006, 103(7): 2015.
- [2] BARRIOS E, LEE S, VASILIEVA O. Assessing the effects of daily commuting in two-patch dengue dynamics: a case study of Cali, Colombia[J]. Journal of Theoretical Biology, 2018, 453: 14.
- [3] OHKUSA Y, SUGAWARA T. Application of an individual-based model with real data for transportation mode and location to pandemic influenza [J]. Journal of Infection and Chemotherapy, 2007, 13(6): 380.
- [4] BALCAN D, COLIZZA V, GONÇALVES B, *et al.* Multiscale mobility networks and the spatial spreading of infectious diseases[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106(51): 21484.
- [5] CHARAUDEAU S, PAKDAMAN K, BOELLE P Y. Commuter mobility and the spread of infectious diseases: application to influenza in France[J]. PLoS One, 2014, 9(1): e83002.
- [6] KEELING M J, DANON L, VERNON M C, *et al.* Individual identity and movement networks for disease metapopulations[J]. PNAS, 2010, 107(19): 8866.
- [7] TANAKA G, URABE C, AIHARA K. Random and targeted interventions for epidemic control in metapopulation models[J]. Scientific Reports, 2014, 4(1): 1.
- [8] PEREZ L, DRAGICEVIC S. An agent-based approach for modeling dynamics of contagious disease spread [J]. International Journal of Health Geographics, 2009, 8: 50.
- [9] POLETTI C, TIZZONI M, COLIZZA V. Human mobility and time spent at destination: impact on spatial epidemic spreading[J]. Journal of Theoretical Biology, 2013, 338: 41.
- [10] YASUDA H, YOSHIZAWA N, KIMURA M, *et al.* Preparedness for the spread of influenza: prohibition of traffic, school closure, and vaccination of children in the commuter towns of Tokyo [J]. Journal of Urban Health, 2008, 85(4): 619.
- [11] LEVINE B, WILCOSKY T, WAGENER D, *et al.* Mass commuting and influenza vaccination prevalence in New York City: protection in a mixing environment [J]. Epidemics, 2010, 2(4): 183.
- [12] EUBANK S, GUCLU H, KUMAR V S A, *et al.* Modelling disease outbreaks in realistic urban social networks[J]. Nature, 2004, 429(6988): 177.
- [13] GLASS R J, GLASS L M, BEYELER W E, *et al.* Targeted social distancing design for pandemic influenza [J]. Emerging Infectious Diseases, 2006, 12(11): 1671.
- [14] GRASSLY N C, FRASER C. Mathematical models of infectious disease transmission [J]. Nature Reviews Microbiology, 2008, 6(6): 477.
- [15] MERLER S, AJELLI M. The role of population heterogeneity and human mobility in the spread of pandemic influenza [J]. Proceedings of the Royal Society B, 2010, 277(1681): 557.
- [16] LEE J, CHOI B Y, JUNG E. Metapopulation model using commuting flow for national spread of the 2009 H1N1 influenza virus in the Republic of Korea [J]. Journal of Theoretical Biology, 2018, 454: 320.
- [17] ZHANG N, HUANG H, DUARTE M, *et al.* Dynamic population flow based risk analysis of infectious disease propagation in a metropolis [J]. Environment International, 2016, 94: 369.
- [18] BALCAN D, VESPIGNANI A. Phase transitions in contagion processes mediated by recurrent mobility patterns [J]. Nature Physics, 2011, 7(7): 581.
- [19] TIZZONI M, BAJARDI P, DECUYPER A, *et al.* On the use of human mobility proxies for modeling epidemics [J]. PLoS Comput Biol, 2014, 10(7): e1003716.
- [20] ZHANG N, HUANG H, SU B, *et al.* A human behavior integrated hierarchical model of airborne disease transmission in a large city[J]. Building and Environment, 2018, 127: 211.
- [21] SMALL K A, SONG S. "Wastful" commuting: a resolution [J]. Journal of Political Economy, 1992, 100(4): 888.
- [22] WU M, HAN S, SUN M, *et al.* How the distance between regional and human mobility behavior affect the epidemic spreading[J]. Physica A, 2018, 492: 1823.