

文章编号:1003-207(2020)03-0001-10

DOI:10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2020.03.001

# 新型冠状病毒肺炎、人口迁移与疫情扩散防控

杨华磊, 吴远洋, 蔺雪钰

(中南财经政法大学公共管理学院, 湖北 武汉 430073)

**摘要:**2019年出现的新型冠状病毒肺炎,伴随着春运的人口大迁徙,短时间内在全国蔓延开来,给疫情防控带来诸多挑战。基于新型冠状病毒传播的理论进行解析后发现,易感人群、感染人群以及传播介质的结合是影响感染人数的重要通道,其中感染人群的人口迁移是促发疫情扩散的关键,从经验上也求证了上述推断,并进一步分析了影响人口迁移的因素。基于理论分析和经验研究,从人口迁移变量来看,该如何防控呢?针对湖北人迁移的目的地,要重点防控那些比疫情地经济条件好的地区,比如广东和浙江,其是湖北外出的首选和次选地;针对迁移湖北的来源地,要重点防控那些人口较多的、与湖北毗邻且与湖北交通极其便利的省份,其是湖北外地人中的主要来源地,比如河南和湖南。除降低与疫情地相关的人口迁移变量外,理论分析还发现,减少易感人群和感染人群的接触,提高医护水平,对易感人群进行接种也能抑制疫情的扩散。

**关键词:**新型冠状病毒;肺炎;人口迁移;COVID-19

**中图分类号:**C939

**文献标识码:**A

## 1 引言

2019年12月27日出现严重肺炎症状的三名成年患者被收入武汉金银潭医院,经确诊后,三名患者均感染新型冠状病毒(COVID-19),自此新型冠状病毒正式进入大众视线。随后,科研人员从公共卫生学和病理学的角度进行科研攻关,对新型冠状病毒肺炎的样本进行研究后发现,患者不仅与华南海鲜市场是否接触有关,并且新型冠状病毒存在明显的“人传人现象”,因为1月出现的绝大多数病例与海鲜市场并无关联<sup>[1-3]</sup>。就目前病例情况来看,下至1个月大的婴儿上至90岁高龄老人都属于易感人群。鉴于此,感染人群主要为去过、接触过以及具有华南海鲜市场暴露史的人员,加之此时春运人员返乡流动的助推,无疑扩大了疫情的传播范围,给疫情的防控带来了诸多困难。

病情的传播十分迅速。截至到武汉“封城”前,省内襄阳、宜昌以及十堰等地发现多起确诊病例,仅湖

北省累计确诊444例。随着春运的人口大迁徙,截至到2月24日上午7时,最新数据统计显示,全国确诊病例累计达77050例,其中死亡病例达2445例,湖北省确诊病例达64084例,广东和浙江作为湖北迁出的主要目的地,确诊病例分别达1342例和1205例,位居湖北省外第一和第三,河南和湖南分别作为迁入湖北的主要来源地,确诊病例分别达1271和1016例,位居湖北省外第二和第四;国外累计确诊病例达1939例,死亡23例<sup>[4]</sup>,包括美国、日本和韩国等,已有29个国家和地区出现确诊病例且疫情呈现继续扩大趋势,防治工作十分严峻。

面对飞速传播的疫情,武汉政府决定于1月23日暂停全市所有公共交通工具的运行并暂时关闭离汉通道,减少在汉人员向全国各地的流动<sup>[5]</sup>。次日,广东、浙江等地先后启动重大突发公共卫生事件一级响应。即便如此,疫情的扩散仍然对民众生活和社会经济造成了严重影响。从生活上看,流通渠道的关闭使得生活物品供不应求,特别是预防病毒传播的口罩、酒精以及消毒液等,各大药店纷纷售空,疫情的飞速传播使人民内心十分恐慌。从社会经济上看,疫情对交通运输以及住宿餐饮等相关产业造成了极大的冲击。同时,疫情带来的返工延迟也将对第二产业增速产生明显拖累。据相关推算,疫情可能促使第一季度经济下降高达1.2个百分点左

收稿日期:2020-02-09; 修订日期:2020-02-24

基金项目:教育部社科一般项目(19YJC790167);湖北省社科一般项目(2018047)

通讯作者简介:杨华磊(1986-),男(汉族),河南平舆县人,中南财经政法大学公共管理学院,讲师,硕士生导师,研究方向:劳动与社会保障, E-mail: home@zu-el.edu.cn.

右,全年经济增速下降 0.4 个百分点<sup>[6]</sup>。

为何此次疫情传播如此之迅速,需从病毒本身、时间、地点以及防治工作四个方面进行分析。首先,COVID-19 初期症状较轻,难以防控;其次,此次疫情发生正处于春运节点,春运作为中国最大的人口迁移潮,平均每年输送 30 亿次旅客,人口流动中的直接或间接接触使病毒从湖北扩散至全国;再次,疫情发生在武汉,武汉作为我国四大综合交通枢纽之一,九州通衢,巨大的客流量不断地扩大密切接触者的流动半径。最后,疫情流行初期,由于对新疾病认识不足,忽略了人传人的途径,贻误采取措施的最佳时间,给病毒扩散以可乘之机。

总之,感染人群和易感人群的接触是疫情传播的重要通道,其中迁移是促进其结合的关键。本文基于人口迁移的视角,首先,从理论去理清新冠病毒传播的机制,并回答人口迁移通过哪些变量影响病毒传播;其次,基于理论分析,从经验求证上述机制推断;最后,基于理论和经验分析,基于人口迁移规律,明晰当前疫情和今后类似疫情的防控重点。相比杨雨琦等<sup>[7]</sup>、杨政等<sup>[8]</sup>以及李承倬等<sup>[9]</sup>的已有研究,本文贡献在于,从理论上分析新冠病毒的传播机理和传播因子人口迁移,并基于经验从全国层面上求证上述理论推断;从人口迁移的角度,给当前疫情防控和未来类似疫情预警和防控提供启发。

## 2 理论分析

### 2.1 SIR 模型

结合新型冠状病毒肺炎的传染特点,采用研究传染病的 SIR 模型。参考周义仓和唐云<sup>[10]</sup>、李贝等<sup>[11]</sup>、姚玉华和孙丽华<sup>[12]</sup>、刘云忠等<sup>[13]</sup>、李玉华<sup>[14]</sup>以及张发等<sup>[15]</sup>的研究,模型设定如下:初始的易感染人数和感染人数分别为  $S_0$  和  $I_0$ ;  $t$  时间易感染人数和感染人数分别记为  $S(t)$  和  $I(t)$ ,若不考虑出生人口和自然死亡等,两者相加为常数。

$t$  时间  $\frac{dS(t)}{dt}$  正比于易感染人数  $S(t)$  和感染人数  $I(t)$  的乘积项  $-\lambda S(t)I(t)$ ,其中传染率  $\lambda$  取决于传染介质,人口密度、交通密度越大以及经济社会活动越频繁,易感染人数减少的就越多。则易感染人数的动力学方程为:

$$\frac{dS(t)}{dt} = -\lambda S(t)I(t) \quad (1)$$

易感染人数减少量通常是新增感染人数。考虑到感染人数存在死亡和治愈,如果治愈率和死亡率

分别记为  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$ ,总退出率  $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$ 。则感染人数的动力学方程为:

$$\frac{dI(t)}{dt} = \lambda S(t)I(t) - \alpha I(t) \quad (2)$$

对易感人数动力学方程(1)和感染人数动力学方程(2)进行整理,建立新型冠状病毒传染的动力学微分方程组则有:

$$\begin{cases} \frac{dS(t)}{dt} = -\lambda S(t)I(t) \\ \frac{dI(t)}{dt} = \lambda S(t)I(t) - \alpha I(t) \\ S(0) = S_0 > 0 \\ I(0) = I_0 > 0 \\ 0 \leq \lambda, \alpha, \delta \leq 1 \end{cases} \quad (3)$$

### 2.2 理论分析

令  $\sigma = \frac{\alpha}{\lambda}$  和  $\frac{1}{\sigma} = \frac{\lambda}{\alpha}$ ,其中  $\frac{1}{\sigma} = \frac{\lambda}{\alpha}$  为相对剔除率。接下来分析易感人数和感染人数随时间的变化特征。由于  $S(t)$ 、 $I(t)$  以及  $\lambda$  非负,根据  $\frac{dS(t)}{dt} = -\lambda S(t)I(t) \leq 0$ ,即易感染人数单调递减。这意味着对任意时间  $t$ ,均有  $S(t) \leq S_0$  成立。

基于  $\frac{dI(t)}{dt} = \alpha I(t)[\sigma S(t) - 1]$  以及  $\alpha I(t) > 0$ ,令  $r = S_0\sigma$ ,考虑到  $S(t) \leq S_0$  成立,当  $r = S_0\sigma < 1$  时,则有  $\sigma S(t) \leq 1$  成立,此时感染人数  $I(t)$  随着时间变化而趋于消失;当  $r = S_0\sigma > 1$  时,考虑到  $S(t)$  单调减少,存在唯一的  $t_0$ ,在  $[0, t_0]$  之间感染人数  $I(t)$  单调递增,在  $(t_0, \infty)$  之间感染人数  $I(t)$  单调递减,当时间为  $t_0$  时,  $S(t_0) = \frac{1}{\sigma}$ ,感染人数  $I(t)$  达到最大,此时感染人数为  $1 - \frac{1}{\sigma} - \frac{1}{\sigma} \ln(\sigma S_0)$ 。

对方程组进一步整理,可得易感人数和感染人数之间的关系:

$$\frac{dI(t)}{dS(t)} = -1 + \frac{1}{\sigma S(t)} \quad (4)$$

根据  $\frac{dI(t)}{dS(t)} = -1 + \frac{1}{\sigma S(t)}$ ,当  $1 > \sigma S(t)$  时,  $I(S)$  单调递增;当  $1 < \sigma S(t)$  时,  $I(S)$  单调递减。考虑到  $I(S)$  与  $S(t)$  关系是可分离变量的微分方程,求解微分方程,则有:

$$I(S) = S_0 + I_0 - S - \frac{1}{\sigma} \ln\left(\frac{S_0}{S}\right) \quad (5)$$

为获得  $I(t)$  和  $S(t)$  间的相图,考虑到  $S(t) +$

$I(t) = 1$  以及  $0 \leq S_t, I_t \leq 1$ , 则  $I(t)$  和  $S(t)$  落在图 1 三角区域:

$D = \{(S, I) \mid 0 \leq S_t \leq 1, 0 \leq I_t \leq 1, S_t + I_t = 1\}$  内, 则有:

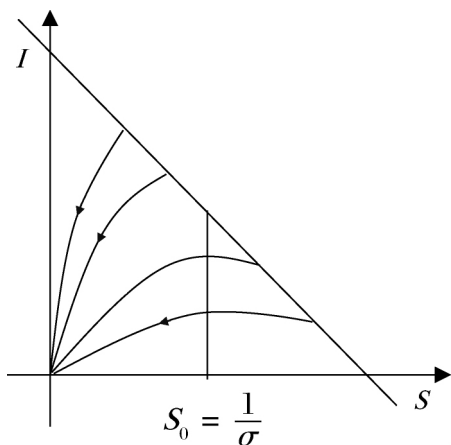


图 1 感染人数和易感人数相图

### 2.3 进一步讨论

为对抗病毒, 对民众接种, 如果接种率为  $\delta$ , 则易感染人数增量还正比于  $\delta S_t$ , 公式(3)可改为:

$$\begin{cases} \frac{dS(t)}{dt} = -\lambda S(t)I(t) - \delta S(t) \\ \frac{dI(t)}{dt} = \lambda S(t)I(t) - \alpha I(t) \\ S(0) = S_0 > 0 \\ I(0) = I_0 > 0 \\ 0 \leq \lambda, \alpha, \delta \leq 1 \end{cases} \quad (6)$$

考虑到  $-\lambda S(t)I(t) - \delta S(t) < 0$ , 即易感人数是单调递减的。感染人数轨迹依赖于  $r = S_0\sigma$  与 1 的关系。当  $r = S_0\sigma < 1$  时, 感染人数随时间变化会趋于消失。当  $r = S_0\sigma > 1$  时, 考虑到  $S(t)$  单调减少, 存在唯一  $t_0$ , 在  $[0, t_0]$  之间感染人数  $I(t)$  单调递增, 在  $(t_0, \infty)$  之间感染人数  $I(t)$  单调递减, 当时间为  $t_0$  时或者  $r = \frac{1}{\sigma}$  时, 感染人数达到最大值  $I(\frac{1}{\sigma})$ 。根据微分方程(6),  $I(t)$  的具体形式为:

$$I(t) + \ln \left| \frac{I(t)}{I_0} \right| = 1 - S + \frac{1}{\sigma} \ln \left( \frac{S_0}{S} \right) \quad (7)$$

把  $r = \frac{1}{\sigma}$  代入公式(7)中, 与不考虑接种时的感染人数最高值相比, 接种下的感染人数小于不接种下的最高人数, 即:

$$I\left(\frac{1}{\sigma}\right) = 1 - \frac{1}{\sigma} - \frac{1}{\sigma} \ln(\sigma S_0) - \ln \left| \frac{I(\frac{1}{\sigma})}{I_0} \right| < 1 -$$

$$\frac{1}{\sigma} - \frac{1}{\sigma} \ln(\sigma S_0) \quad (8)$$

综上所述可以发现, 易感人群和感染人群的接触, 即乘积项  $\lambda S(t)I(t)$  会导致感染人数的增加引致疫情的扩散; 如果感染者与易感染人群间接接触频繁, 即感染系数  $\lambda$  变大, 同样会导致感染人数增加; 医护水平提高时, 感染人数会减少; 相比不接种, 民众接种时, 感染人数会减少。所以未来降低感染人数的方案中, 政府要降低感染人员和易感染人员的接触; 在没有接种下易感染民众要做好防护, 减少接触, 降低感染率系数  $\lambda$ ; 提升医护水平, 进而提高治愈力  $\alpha$ , 减少已感染人数; 科研人员加快研发疫苗, 给民众接种, 提高免疫率  $\delta$ , 降低易感染人群。

从上述理论分析可以发现, 感染人群和易感染人群的接触是疫情扩散的根本原因, 在中国春运人口大迁移的背景下, 接触的关键变量是人口迁移。这种理论推断在经验上是否成立, 人口迁移如何影响各省感染人数, 人口迁移受哪些变量影响呢? 这有助于当前疫情控制以及未来类似疫情预警指标的构建。为求证上述理论推断, 接下来从经验上加以求证。

## 3 经验求证

### 3.1 模型设定

根据理论分析, 感染人数主要受到易感人数、感染人数、传播介质、医疗条件以及免疫措施等因素综合的影响。各省已感染人数 ( $Y$ ) 当作因变量; 易感人数近似看作各省常住人口; 考虑初始感染人数与湖北相关, 与湖北相关人口可近似看作携带病毒的已传染人数, 进而把各省常住人口 ( $P$ )、湖北迁移到各省的人口 ( $PHM$ ) 和各省迁移到湖北的人口 ( $PMH$ ) 当作各省易感染人数和已感染人数, 把人口密度 ( $PD$ ) 以及交通密度 ( $TD$ ) 等看作疫情的传播介质。这就生成上述理论模型的易感染人群、感染人群和传播介质。

除此之外, 还考察是什么因素影响湖北人迁入到外省以及外省人口迁入到湖北。基于此, 选取各省常住人口、是否与湖北毗邻 ( $neighbor$ )、是否属于南方省份 ( $region$ )、所在省份与湖北间的高铁数量 ( $QHrail$ )、所在省份与湖北间的地理距离 ( $distan$ ) 以及所在省份居民人均可支配收入与湖北居民人均可支配收入之间的对比 ( $comparison$ ) 等变量, 各变量的界定见表 1。感染人数以及迁移人口模型设定如下:

$$Y_i = \alpha + \beta_i X_i + \mu_i Z_i + \varepsilon_i \quad (9)$$

$$M_i = c + \mu_i D_i + \theta_i \quad (10)$$

其中  $i$  代表第  $i$  个省份,  $Y_i$  是主要解释变量;  $M_i = (PHM_i, PMH_i, PM_i)$  是模型(10)的被解释变量。  $X_i = (P_i, PHM_i, PMH_i)$  是模型(9)的主要解释变量,  $Z_i = (PD_i, TD_i)$  是模型(9)的控制变量;  $D_i = (P_i, neighbor_i, region_i, QHrail_i, distan_i, comparison_i)$  是模型(10)的解释变量。  $\beta_i$ 、 $\gamma_i$  和  $\mu_i$  代表模型(9)和模型(10)需要估计的参数,  $\varepsilon_i$  和  $\theta_i$  代表随机误差项,即其他影响感染人数的变量。

各省感染人数来源于百度疫情适时大数据报告<sup>[4]</sup>。湖北迁移到各省的人口数、各省迁移到湖北

的人口数来源于《2015 年全国 1% 人口抽样调查资料》<sup>[16]</sup>; 各省常住人口、交通里程以及居民人均可支配收入来源于 2018 年《中国统计年鉴》<sup>[17]</sup>, 各省面积来源国土资源部; 根据中国南北地理分界线秦岭淮河一线, 省会在此线南边的属于南方, 否则属于北方; 各省间高铁数, 仅计算各省省会与武汉间的高铁数量, 通过 12036 网站<sup>[18]</sup> 可以获得各省省会通往武汉的高铁数。其他变量的数据, 比如人口密度是各省常住人口除以相应国土面积, 各省交通密度等于各省公路、铁路以及水运里程和除以各省国土面积, 具体各变量的描述性统计见表 1。

表 1 变量的描述性统计

变量	界定	样本数	平均值	标准差	最小值	最大值
感染人数	简称 NCOV, 单位: 人	31	2481.806	11439.86	1	64084
湖北迁移到各省的人口数	简称 PHM, 单位: 百人	30	3187	7405.853	85	39734
各省迁移到湖北的人口数	简称 PMH, 单位: 百人	30	989.067	997.348	60	4489
各省常住人口数量	简称 P, 单位: 万人	31	4478.516	2866.818	337	11169
人口密度	简称 PD, 一平方公里上人数, 单位: 人	31	459.339	705.206	2.743	3813.88
交通密度	简称 TD, 一平方公里上交通里程, 单位: 公里	31	1.016	0.598	0.073	2.512
是否与湖北地理上毗邻	简称 neighbor, 毗邻=1, 不毗邻=0	30	0.233	0.43	0	1
是否属于南方	简称 region, 南方=1, 其他=0	30	0.467	0.507	0	1
省会与武汉之间的高铁数	简称 QHrail, 单位: 辆	30	21.1	26.61	0	99
与湖北省之间的距离	简称 distan, 单位: 公里	30	1230.333	721.342	327.1	3263.8
人均可支配收入是否高于湖北	简称 comparison, 高于=1, 其他=0	31	0.387	0.495	0	1

从表 1 可以看出, 截止到 2020 年 2 月 24 日上午 7 时前, 全国各省平均感染人数 2481 人, 湖北以外省份, 感染人数最多的为广东 1342 人, 感染人数最少的为西藏 1 人; 湖北平均迁移到各省的人口为 31.87 万人, 最多的为广东, 最少的为西藏; 各省平均迁移到湖北的人口为 9.891 万人, 最多的为河南 44.89 万人, 最少的为宁夏 0.6 万人; 各省平均常住人口为 2866.818 万人, 最多的为广东省, 最少的为西藏; 人口密度最大的是上海, 一平方公里上 3813 人, 最小的为西藏自治区, 一平方公里上 2 人; 交通密度最大的为上海, 最低的为西藏, 等等。

### 3.2 人口迁移与感染人数

为观测人口迁移与各省感染人数之间的关系, 把湖北迁移到各省的人口、各省迁移到湖北的人口、各省常住人口<sup>[10]</sup> 以及各省感染人数<sup>[4]</sup> 绘制在表 2 中。从表 2 第 2 列可看出, 湖北人最喜欢迁入的省份依次为广东、浙江、上海、江苏、北京以及福建等比

湖北经济发达的省份, 湖北最不喜欢迁入的省份为西藏、宁夏、内蒙古以及东北三省, 即西北与东北等经济欠发达地区; 从表 2 第 4 列可看出, 迁入湖北的人口中周边省份居多, 从高到低依次为河南、湖南、广东、重庆、安徽以及江西等, 从低到高依次为青海、西藏、宁夏、吉林、辽宁以及天津等西北和东北省份; 在常住人口中, 从高到低依次为广东、山东、河南、四川、江苏以及河北, 较少的为新疆、青海、西藏、宁夏、内蒙古以及吉林等西北和东北省份。

除湖北外各省的感染人数中, 从高到低依次为广东、浙江、河南、湖南、安徽、江西、江苏等。这些排名靠前的省份, 要么是湖北外迁主要目的地广东、浙江以及江苏等经济发达省份, 要么是湖北外地人主要来源地河南、湖南、安徽以及江西等周边省份, 感染人数较少的多为湖北人口不喜欢前往的西北和东北地区, 比如西藏、青海、新疆、宁夏、内蒙古以及吉林等省份。这直观上印证了“人口的迁移深刻影响

着各省的感染人数,湖北人迁移的主要目的地以及湖北省外地人的主要来源地是感染的重灾区,相反湖北人不喜欢去的以及不喜欢迁移到湖北的西北和

东北地区疫情相对较弱”的观点。为更加严谨地求证上述观点,下文将给出计量结果,见表3。

表2 与湖北相关的人口迁移和感染人数

排序	省份	PHM 单位:万人	省份	PMH 单位:万人	省份	P 单位:万人	省份	NCOV 单位:人
1	湖北	—	湖北	—	广东	11169	湖北	64084
2	广东	397.34	河南	44.89	山东	10006	广东	1342
3	浙江	124.51	湖南	28.8	河南	9559	河南	1271
4	上海	73.55	广东	20.79	四川	8302	浙江	1205
5	江苏	60.77	重庆	20.65	江苏	8029	湖南	1016
6	北京	49.39	安徽	20.6	河北	7520	安徽	989
7	福建	43.96	江西	17.32	湖南	6860	江西	934
8	湖南	25.08	四川	15.97	安徽	6255	山东	754
9	天津	23.51	浙江	15.59	湖北	5902	江苏	631
10	四川	15.04	山东	13.34	浙江	5657	重庆	575
11	江西	12.49	福建	13.06	广西	4885	四川	526
12	云南	12.25	江苏	12.33	云南	4801	黑龙江	480
13	河南	10.93	河北	8.63	江西	4622	北京	399
14	安徽	10.62	贵州	8.38	辽宁	4369	上海	335
15	陕西	10.33	陕西	7.26	福建	3911	河北	311
16	山东	9.76	广西	6.67	陕西	3835	福建	293
17	河北	9.4	云南	5.21	黑龙江	3789	广西	249
18	山西	8.86	山西	4.85	山西	3702	陕西	245
19	贵州	8.05	甘肃	4.85	贵州	3580	云南	174
20	广西	7.97	新疆	4.38	重庆	3075	海南	168
21	新疆	7.73	上海	3.37	吉林	2717	贵州	144
22	重庆	7.6	黑龙江	3.19	甘肃	2626	天津	135
23	海南	7.15	海南	2.91	内蒙古	2529	山西	132
24	甘肃	4.24	内蒙古	2.74	新疆	2445	辽宁	121
25	青海	3.23	北京	2.67	上海	2418	吉林	91
26	辽宁	2.85	辽宁	2.11	北京	2171	甘肃	91
27	黑龙江	2.74	吉林	1.92	天津	1557	新疆	76
28	内蒙古	2.73	天津	1.65	海南	926	内蒙古	75
29	吉林	2.18	青海	1.23	宁夏	682	宁夏	71
30	宁夏	0.99	西藏	0.76	青海	598	青海	18
31	西藏	0.85	宁夏	0.6	西藏	337	西藏	1

### 3.3 基本结果与讨论

易感人群和感染人群的接触是传染的主要通道,其中人口迁移是接触的关键。为从经验上求证上述推断,给出三个计量回归模型。模型1放各省

常住人口与感染人数变量;模型2放湖北人迁移到各省的人口、各省迁移到湖北的人口以及感染人数变量;模型3放各省常住人口分别与湖北人迁移到各省人口和各省迁移到湖北的人口的交叉项;模型

4 是在模型 3 的基础上放入表征传播介质的变量。考虑到易感人群和感染人群接触的频繁程度不易测量,则采用人口密度和交通密度等接触条件来测量

传播介质的易传程度,在此重点关注模型 4 的回归结果。

表 3 感染人数的人口迁移因素

	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4
P	0.473 (0.417)			
PHM		0.0195*** (0.00452)		
PMH		0.309*** (0.0344)		
P*PHM			0.00000115** (0.000000455)	0.00000120*** (0.000000367)
P*PMH			0.0000324*** (0.00000649)	0.0000253*** (0.00000581)
PD				-0.104* (0.0516)
TD				265.4*** (82.39)
_cons	363.3 (805.6)	60.64* (34.48)	194.9*** (43.71)	21.45 (46.34)
N	31	30	30	30
R <sup>2</sup>	0.014	0.831	0.721	0.780

注: \*、\*\*、\*\*\* 表示在 10%、5% 和 1% 水平上显著;括号内为标准误。

从模型 1—4 可以看出,其一,模型 1 显示,常住人口系数为正,但不显著,这意味着没有传染源的各省将不会有感染人数;模型 2 显示,湖北迁移到各省的人口以及各省迁移到湖北的人口越高,各省感染的人数也越多,这源于春运人口迁移的背景下,感染人群各省迁移到的湖北人口以及湖北外迁的人口返乡、探亲或者旅游去各省,导致相应省份感染源增加,感染源和易感人群的接触使得湖北迁移到各省的人口以及各省迁移到湖北的人口每增加 1 万人,相应省份感染人数分别增加 1.15 人和 32.4 人。

模型 3 显示,各省常住人口和湖北迁移到各省的人口以及各省迁移到湖北的人口的交叉项对感染人数有显著的正向影响,这基本验证了前述的理论推断,感染人数取决于易感人群和感染人数的接触与接触程度,即感染人数正比易感人数、感染人数以及传染因子的乘积。考虑到传染因子取决于传播介质,模型 4 显示,人口密度和交通密度对各省感染人数的影响并不显著,这意味着影响感染人群和易感人群接触的因子不仅受客观人口密度和交通密度的影响,还取决于政策以及民众的疫情素养,这也意味着断桥阻路等摧毁交通阻断传染源在抑制感染人数方面并不可取,关键是民众能够提升疫情素养和响

应国家号召,积极进行隔离。总之,降低感染人数的关键是降低感染人群和易感染人群的接触以及接触后的传染因子。

## 4 进一步讨论

### 4.1 人口迁移的影响因素分析

从上一节分析可以看出,影响各省感染人数的关键是表征为各省常住人口的易感染人群与表征为与湖北相关人口的感染人群的接触,接触的关键是春运下的人口迁移,其中与湖北相关人口包括湖北迁移到各省的人口以及迁移到湖北的各省人口。是什么影响湖北迁移到各省的人口数以及各省迁移到湖北的人口数呢?对这个问题的探究有利于把握人口的流向,当前疫情的防控以及以后类似疫情预警机制和指标的建立。基于王桂新等<sup>[19]</sup>、李建平和邓翔<sup>[20]</sup>、王秀芝<sup>[21]</sup>、冷智花等<sup>[22]</sup>、吕晨<sup>[23]</sup>、林李月和朱宇<sup>[24]</sup>以及乔晓春<sup>[25]</sup>等学者关于人口迁移的影响因素研究,选取各省常住人口、与湖北省是否毗邻、是否属于南方、与湖北通高铁数量、与湖北的空间距离以及各省人均可支配收入与湖北的比较作为主要解释变量;湖北迁移到各省的人口数、各省迁移到湖北的人口数以及两者之和作为被解释变量,相应生

成模型 5、模型 6 以及模型 7。通过一般的 OLS 回归, 回归结果如表 4。

从下表 4 中可以看出, 其一, 影响湖北迁移到各省的人口只取决于经济条件, 即居民生活是否好于湖北, 居民人均可支配收入高于湖北的省份平均比差于湖北的省份吸纳的湖北人口平均多 50.27 万人。其二, 各省份的常住人口越多其迁移到湖北的人口也显著越多, 常住人口每增加 1 万人, 去湖北的人口增加 13.6 人; 与湖北省毗邻的省份更可能迁移到湖北, 与湖北毗邻的省份迁移到湖北的人口平均比不与湖北毗邻的省份迁移到湖北的人口多 7.758 万人; 与湖北通的高铁数量越多, 迁移到湖北省的各省人口也显著越多, 高铁数量每增加 1 辆, 迁入湖北省的人口增加 0.122 万人; 空间距离、经济发展水平以及是否属于南方对迁移到湖北的人口影响并不显著。其三, 与湖北省相关迁移人数仅受是否属于南方以及其与湖北省经济水平比较两变量影响。

表 4 人口迁移的影响因素

	模型 5 PHM	模型 6 PMH	模型 7 PTH
P	0.790 (0.733)	0.136*** (0.0303)	0.927 (0.728)
neighbor	-4445.3 (3392.2)	775.8** (277.4)	-3669.5 (3268.7)
region	3663.1 (2215.4)	118.6 (266.5)	3781.8* (2166.7)
QHrail	103.5 (82.97)	12.25* (6.293)	115.7 (81.88)
distan	3.308 (2.803)	-0.114 (0.140)	3.195 (2.746)
comparison	5027.7** (2363.9)	-49.19 (174.0)	4978.5** (2365.5)
_cons	-9083.7 (7465.6)	47.51 (273.3)	-9036.2 (7365.1)
N	30	30	30
R <sup>2</sup>	0.472	0.821	0.518

注: \*, \*\*, \*\*\* 表示在 10%、5% 和 1% 水平上显著; 括号内为标准

#### 4.2 基于人口迁移的疫情防控

前面的经验和理论分析发现, 湖北迁移到各省的人口以及各省迁移到湖北的人口是把疫情带到各地的关键。传染源之一为湖北迁移到各省的人口, 考虑到影响湖北迁移到各省的人口数的关键因子是经济条件, 即居民经济状况是否好于湖北。从人口迁移变量来看, 应当重点防控那些比疫情地经济状

况好的地区, 比如广东和浙江。由居民人均可支配收入知, 除北京、上海、天津等直辖市以及江苏外, 浙江以及广东位居前列, 均高于湖北居民人均可支配收入, 相应地, 广东和浙江是湖北外迁的首选地和次选地。如此多的外来人口迁移量势必会增加易感人群与感染人群的接触, 进而增加此省被感染人数。截止到 2020 年 2 月 24 日上午 7 时, 湖北以外省份的感染人数, 广东第一, 浙江第三。自疫情爆发以来, 广东和浙江政府也敏锐地意识到这一点, 在全国首批启动了重大突发公共卫生事件“一级响应”, 这一系列迅速有效的措施大大减少了后期被感染的人数, 有效地抑制了疫情的进一步扩散。

传染源之二为各省迁移到湖北的人口, 考虑到各省常住人口越多, 与湖北毗邻及与湖北交通越便利, 迁移到湖北的人口也显著越多, 进而在春运下增加了各省易感人群和感染源的接触机会, 使得相应省份的感染人数增加。从人口迁移变量来看, 应当重点防控那些常住人口较多、与湖北毗邻且与湖北交通极其便利的省份, 比如河南和湖南。首先, 河南和湖南与湖北省毗邻; 其次, 两省常住人口分别位居全国第三和第七; 最后河南和湖南到武汉的交通十分便捷, 高铁数量异常多。由表 2 可知, 迁入湖北的外地人中河南位居第一, 湖南位居第二, 相应地, 河南和湖南也是疫情的重灾区, 除湖北外, 河南和湖南感染人数分别位居全国第二和第四, 分别仅次于广东和浙江。自疫情发生以来, 河南和湖南政府也敏锐的意识到这一点, 尤其是河南。公安厅第一时间成立疫情防控工作专班, 卫生部门全系统进入紧急状态, 基层率先严防死守, 被外界高赞“硬核”; 如此紧张有序的工作, 最大限度地降低易感人群和感染源的接触机会, 避免疫情的进一步蔓延。

#### 5 结语

新型冠状病毒传染的机制是什么, 受哪些因素影响, 通过观测哪些指标可以明确防控重点达到预警并很好防控疫情扩散的目的。对这些问题的回答有助于防范当前疫情的扩散以及对将来类似疫情防控提供经验。为回答上述科学问题, 首先构建新冠病毒传播的动力学方程, 进行理论推演发现, 在传播介质以及医疗条件不变下, 新冠病毒传播的关键是感染人群和易感人群的接触, 而促进感染人群和易感人群接触的主要渠道是人口的迁移。为从经验上求证上述理论推断, 采用经验数据进行研究后发现, 湖北迁移到各省的人口数以及各省迁移到

湖北的人口数,均显著地正向影响各省的感染人数。进一步研究发现,影响湖北迁移到各省的人口数的关键因子是居民的经济状况是否好于湖北;各省常住人口数量、是否与湖北毗邻以及与湖北交通的便捷程度显著影响迁移到湖北的人口数。

上述研究的政策启示在于,在防范当前新冠病毒疫情时,需要很清晰地了解疫情发生地的人口迁移变量,这样有助于防疫工作的有的放矢,明确疫情防控的重点省份和区域,进而尽早部署,做好充分的心理、人员以及物资准备。在新型冠状病毒传播中,考虑到广东和浙江等经济发达区域是湖北外迁的首选目的地,迁移到湖北的人口主要来源地为河南和湖南等与湖北毗邻且交通便利的人口大省,所以在疫情防控上,上述省份要保持高度重视、高度警惕以及高度负责状态,以更强的防控力遏制疫情扩散蔓延势头。在以后类似公共疫情防范中,国家和各地区首先要明晰疫情地的人口迁移方向,明晰各个地区是否是疫情地人口迁移的主要目的地和来源地。在明晰人口迁移变量的同时,为防止疫情扩大,政府还可通过降低感染人群和易感染人员的接触,提高企业和民众的防疫素养等,降低感染率系数;开发和整合公共卫生资源,提高医护条件,减少感染人群;加快研发疫苗,给民众接种,降低易感染人群。

#### 参考文献:

- [1] Zhou Peng, Yang Xinglou, Wang Xianguang, et al. A pneumonia outbreak associated with a new coronavirus of probable bat origin[J]. Nature, 2020, DOI: 10. 1038/s41586-020-2012-7.
- [2] Huang Chaolin, Wang Yeming, Li Xingwang, et al. Clinical features of patients infected with 2019 novel coronavirus in Wuhan, China[J]. The Lancet, 2020, DOI: 10. 1016/S0140-6736(20)30183-5.
- [3] Li Qun, Guan Xuhua, Wu Peng, et al. Early transmission dynamics in Wuhan, China, of novel coronavirus-infected pneumonia[J]. New England Journal of Medicine, 2020, DOI: 10. 1056/NEJMoa2001316.
- [4] 百度. 疫情实时大数据报告[Z]. (2020-02-13)[2020-02-24]. <https://voice.baidu.com/act/newpneumonia/newpneumonia>.
- [5] 湖北省人民政府. 武汉市新型冠状病毒感染的肺炎疫情防控指挥部通告(第1号)[Z]. (2020-01-23)[2020-02-24]. [http://www.gov.cn/xinwen/2020-01/23/content\\_5471751.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2020-01/23/content_5471751.htm).
- [6] 花长春, 陈礼清, 田玉铎. 利用 SEIR 模型推演湖北、非湖北和全国疫情拐点——2020 年突发风险系列[Z]. (2020-02-07)[2020-02-24]. <http://finance.sina.com.cn/wm/2020-02-07/doc-iimxyqvz0930302.shtml>.
- [7] 杨雨琦, 孙琦, 王悦欣, 等. 重庆市新型冠状病毒肺炎(NCP)疫情分析与趋势预测[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版). (2020-02-18)[2020-02-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.n.20200218.0746.002.html>.
- [8] 杨政, 原子霞, 贾祖瑶. 基于迁徙数据估计武汉感染新型冠状病毒的人员数量[J]. 电子科技大学学报. (2020-02-26)[2020-02-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1207.t.20200222.1023.002.html>.
- [9] 李承倬, 武文韬, 潘振宇, 等. 基于 SIR 模型和基本再生数的浙江省新型冠状病毒肺炎防控效果分析[J]. 浙江医学. (2020-02-23)[2020-02-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/33.1109.r.20200224.1610.004.html>.
- [10] 周义仓, 唐云. SARS 传播预测的数学模型[J]. 工程数学学报, 2003, 20(7): 53-62.
- [11] 李贝, 徐海霞, 郭佳佳. 考虑自愈的 SARS 的传播模型[J]. 工程数学学报, 2003, 20(7): 20-28.
- [12] 姚玉华, 孙丽华. SARS 流行病传染动力学模型[J]. 数学的实践与认识. 2004, 34(3): 1-5.
- [13] 刘云忠, 宣慧玉, 林国玺. SARS 传染病数学建模及预防. 控制机理研究[J]. 中国管理科学, 2004, 12(2): 143-148.
- [14] 杨玉华. 传染病模型的研究及应用[J]. 数学的实践与认识, 2007, 37(14): 179-184.
- [15] 张发, 李璐, 宣慧玉. 传染病传播模型综述[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(9): 1736-1744.
- [16] 国家统计局人口和就业统计司. 全国 1% 人口抽样调查资料 2015[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [17] 毛盛勇, 叶植材. 中国统计年鉴 2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [18] 中国铁路 12306[Z]. (2020-2-13)[2020-02-24]. <https://www.12306.cn/index/>.
- [19] 王桂新, 潘泽瀚, 陆燕秋. 中国省际人口迁移区域模式变化及其影响因素——基于 2000 和 2010 年人口普查资料的分析[J]. 中国人口科学, 2012, (5): 4-15.
- [20] 李建平, 邓翔. 我国劳动力迁移的动因和政策影响分析[J]. 经济学家, 2012, (10): 58-64.
- [21] 王秀芝. 省际人口迁移的内在动因及其影响波及[J]. 改革, 2014, (3): 144-150.
- [22] 冷智花, 付畅俭, 许先普. 收入差距与人口迁移——人口学视角的城市化动因研究[J]. 重庆大学学报(社会科学版), 2015, 21(6): 35-44.
- [23] 吕晨. 人口空间集疏的地域偏好与规律研究[J]. 东北师大学报(哲学), 2016, (5): 90-96.
- [24] 林李月, 朱宇. 中国城市流动人口户籍迁移意愿的空间



格局及影响因素——基于2012年全国流动人口动态监测调查数据[J]. 地理学报, 2016, 71(10): 1696—1709.

[25] 乔晓春. 户籍制度、城镇化与中国人口大流动[J]. 人口与经济, 2019, (5): 1—17.

## New Coronavirus Pneumonia, Population Migration and Epidemic Prevention and Control

YANG Hua-lei, WU Yuan-yang, LIN Xue-yu

(School of Public Administration, Zhongnan University of Economics and Law, Wuhan 430073, China)

**Abstract:** Faced with the new corona virus pneumonia (COVID—19) that began in 2019 spread rapidly, what is the mechanism of its infection and what factors affect it? What role does population migration play in infection? By observing variables in population migration, the key points of prevention and control can be know. The answers to these scientific questions will help prevent the spread from the current epidemic and provide experience for similar epidemic in the future.

The first step is to construct a kinetic equation for the new coronavirus. The increase in the number of infections is proportional to the product terms of the number of susceptible people  $S(t)$ , the number of infected people  $I(t)$  and the transmission medium  $\lambda$ . Based on the infectious disease model, after the theoretical deduction, it is found that under the same transmission medium and medical conditions, the key to the spread of new coronavirus is the contact between infected and susceptible people, and the main channel to increase contact is population migration, especially related to Hubei. After further theoretical reasoning, it is found that vaccination of susceptible population will reduce the number of infections.

The second step is to verify the above—mentioned theoretical inference from experience. Based on the timely big data report of the Baidu epidemic, the number of infected people in each province is obtained. Based on the data of the 1% population sample survey in 2015, the data of population migration variables related to Hubei is obtained, and based on the 2018 China Statistical Yearbook, other control variables is obtained that may affect the number of infected people in each province. Using the general least squares model and empirical proof, it is found that the number of people who moved to each province from Hubei and the number of people who moved to Hubei from each province produced a significant positive effect on the number of infected people in each province. After further research, it is found that the key factor that affects the population of Hubei to migrate to each province is whether the economic situation of the residents is better than that of Hubei Province. The permanent resident population of each province, geographical location and the convenience of transportation to Hubei significantly affect the number of people who migrate to Hubei from other provinces.

From the perspective of population migration variables, how can we prevent and control the epidemic? For the destination of Hubei people's migration, we should focus on the prevention and control in those areas with better economic conditions than in the epidemic areas, such as Guangdong and Zhejiang, which are the first and second choice for people in Hubei to go. For the source of Hubei people's migration, we should focus on prevention and control of those provinces with large populations that are adjacent to Hubei and have extremely convenient transportation with Hubei, which are the main sources of non—local persons in Hubei, such as Henan and Hunan. In addition to reducing the population migration variables related to the epidemic area, the theoretical analysis also find that reducing the contact between the susceptible population and the infected population, weakening the transmission medium, improving the medical level, and vaccinating the susceptible population can also inhibit the spread of the disease.

The theoretical significance of this article lies in timely analyzing the transmission mechanism of new coronavirus. The above theoretical inference is proved empirically; The key to the transmission of it is the

contact between the infected and susceptible people and the main channel form of increasing the contact is the population migration, especially related to Hubei. The practical significance of the article is to provide some inspirations for early warning and to prevent current and future epidemic from the perspective of population migration.

**Key words:** new coronavirus; pneumonia; population migration; COVID-19