

新型冠状病毒肺炎疫情联防联控策略评价与开放离鄂通道影响的预测*

宋鹏飞

(西安交通大学数学与统计学院, 西安, 710049)

陈灿贻

(中国人民大学统计与大数据研究院, 北京, 100872)

楼元

(俄亥俄州立大学数学系, 俄亥俄, 哥伦布, 43210)

姜慧

(首都医科大学附属北京胸科医院, 北京, 101149)

李卫民

(首都医科大学附属北京胸科医院, 北京, 101149; 北京市结核病胸部肿瘤研究所耐药结核病研究北京市重点实验室, 北京, 101149; 首都医科大学临床流行病学北京重点实验室, 北京, 100069)

朱利平*

(中国人民大学统计与大数据研究院, 中国人民大学国家发展与战略研究院, 北京, 100872)

摘要: 我们利用传播动力学模型, 基于国家卫健委公布的确诊人数、痊愈人数和因病死亡人数, 得到如下三个结论. 1、中国政府采取的联防联控机制已经对新型冠状病毒肺炎疫情防控起到了显著效果. 湖北省的基本再生数从2月3日之前的3.86 (即一个感染者在感染周期内将导致3.86人感染) 逐渐降为2月8日之后的0.42; 浙江、广东、河南、湖南、江西、安徽、北京和上海等六省二市的基本再生数从1月30日之前的3.68降为2月4日之后的0.18. 2、无症状感染者和有症状感染者在确诊前的感染力接近. 新型冠状病毒肺炎疫情防控的难点在于隔离并及时收治无症状感染者. 湖北省无症状感染者人数从2月5日的最高点(23,068人) 逐步回落到2月29日的2,935人, 湖北省的疫情防控形势依然非常严峻; 浙江、广东、河南、湖南、江西、安徽、北京和上海六省二市无症状感染者人数在2月29日已经回落至5~21人之间, 这些地区新型冠状病毒肺炎疫情已经得到了初步控制. 3、选择放松离鄂通道交通管制措施的时机需要非常谨慎. 传播动力学模型预测, 如果在5月中旬或6月中旬放松离鄂通道交通管制措施, 允许每天从湖北输入10万无症状人群到浙江、广东、河南、湖南、江西、安徽、北京和上海等六省二市, 则一个半月后输入地感染人数将累计增加5.5人或1.3人. 但如果选择在3月中旬或4月中旬放松离鄂通道交通管制措施, 一个半月以后输入地感染人数将累计增加93人或22人.

关键词: 新型冠状病毒; SEIR模型; 基本再生数; 无症状感染者; 预测

中图分类号: O29

英文引用格式: SONG P F, CHEN C Y, LOU Y, et al. Assessing effectiveness of integrated strategies for preventing and controlling the outbreak of COVID-19, and predicting impact of opening exit channels to leave Hubei province [J]. Chinese J Appl Probab Statist, 2020, 36(3): 321-330. (in Chinese)

*北京市自然科学基金项目 (批准号: Z19J00009) 和国家自然科学基金项目 (批准号: 11731011、11931014) 资助.

*通讯作者, E-mail: zhu.liping@ruc.edu.cn.

本文2020年3月11日收到.

§1. 现阶段疫情防控面临的三个问题

2019 年 12 月, 武汉市部分医疗机构陆续报告不明原因肺炎病例, 此后确定病因为感染新型冠状病毒^[1]. 由于前期对该病毒认识不足, 武汉市的防控措施不充分, 导致疫情蔓延. 截至 2020 年 2 月 29 日, 湖北省累计确诊病例 66,907 例, 死亡 2,761 例, 分别占全国的 83.6%, 96.1%. 全国的病死率为 3.59%, 其中, 湖北省病死率为 4.12%, 远高于全国其他地区 0.85% 的病死率^[2].

为了迅速遏制疫情的快速发展, 中国政府高度重视, 各级政府纷纷采用疫情防控一级响应. 自 1 月 23 日开始, 湖北境内民航、铁路、公路、水路客运等外出通道陆续关闭. 在全国范围内, 许多城市或农村甚至完全封闭小区或村庄. 这些严格的防控措施让湖北甚至全国的消费和生产活动大幅放缓, 中国为此正在承受巨大的经济代价. 在付出沉重的经济代价后, 如何检视全国联防联控机制是否起到了“控制传染源、切断传播途径、保护易感人群”的效果?

新型冠状病毒肺炎疫情防控的难点在于存在大量无症状感染者而且潜伏周期长. 钻石公主号邮轮上载有 3,711 人, 有 634 人 (17.1%) 确诊感染新冠病毒, 其中有 322 人 (50.8%) 是无症状感染者. “控制传染源”、“提高收治率”的关键是及时隔离并收治无症状感染者. 自第五版《新型冠状病毒感染的肺炎诊疗方案》起便明确指出, “无症状感染者也可能成为传染源”. 无症状感染者与有症状感染者相比, 感染力是否存在差别? 如何估算无症状感染者的数量呢? 全国联防联控机制是否显能够减少了无症状感染者呢?

全国联防联控机制与本次新型冠状病毒肺炎疫情鏖战接近一个月. 随着春节假期的结束, 全国各地都面临返程复工问题. 大量返程复工人员即将返回工作岗位, 投入到重点物资和生活必需品的生产中去, 打响“经济保卫战”. 2020 年 2 月 24 日上午 11 点, 武汉市新型冠状病毒肺炎疫情防控指挥部发出了《关于加强进出武汉市车辆和人员管理的 (第 17 号)》令, 允许少数、特定人群可以离开武汉, 但该 17 号令在 3 个小时后被宣告无效. 武汉市坚持贯彻习近平总书记关于“外防输入”的重要指示精神, 严格离汉通道管理, 严格人员管控, 严防疫情向外输出. 一旦放开离鄂通道交通管制措施, 大量无症状人群势必将从湖北输入京津冀、长三角、珠三角以及湖北周边省份. 评估不同方式和时间放开离鄂通道交通管制措施、湖北省的流出人口对输入地疫情防控的影响, 对全国一盘棋的联防联控机制具有“预警”作用.

本文将主要围绕疫情防控措施的效果、无症状感染者以及放松离鄂通道交通管制措施的风险预测三个方面展开研究.

§2. 模型介绍

为了便于描述我们提出的模型, 我们首先介绍一下新型冠状病毒肺炎疫情涉及的 5 个人群: 易感人群、无症状感染者人群、有症状感染者人群、痊愈者人群和因病死亡人群.

其中, 易感人群是指尚未感染病毒的健康人群; 无症状感染者人群是已感染病毒但尚未表现出临床症状的人群; 有症状感染者人群一般被直接称为感染者人群, 但在本文中, 为了区分无症状感染者, 我们用有症状感染者来表示已感染病毒并明显表现出临床症状的人群; 痊愈者人群是指经过治疗以后重获健康的人群; 因病死亡人群是指因为感染病毒丧失生命. 我们假设痊愈者人群与因病死亡人群一样不再参与感染或被感染过程.

为了研究从湖北无症状人群 (包括易感人群、无症状感染者及痊愈人群) 迁移至浙江、广东、河南、湖南、江西、安徽、北京和上海等六省二市, 对输入地累计感染人数的影响. 我们提出扩展的SEIR-两斑块 (S : 易感人群; E : 无症状感染者; I : 有症状感染者; R : 痊愈人群) 传播动力学模型^[3-5]. 第一个斑块对应湖北, 第二个斑块对应六省二市的其中一个地区. 2020年1月23日开始, 湖北省部分城市实施了交通管制措施 (如, 武汉市实施了“封城”策略), 限制了从湖北省迁入到六省二市的其中一个地区的人群数量. 但是, 一旦确定允许返程时间 (T_0), 那么感染人群因为交通运输系统的排查措施 (比如体温监测) 会被阻止进入六省二市的其中一个地区. 但是, 易感人群和潜伏人群均有可能从湖北省迁移到六省二市的其中一个地区. 因此, 我们将 t 时刻从湖北迁移到六省二市的其中一个地区的人口假设为 $d(t)$. 模型如下:

$$\begin{cases} S'_1 = -c_1(t)\beta_{1I}S_1I_1/N_1 - c_1(t)\beta_{1E}S_1E_1/N_1 - d(t)S_1/N_1, \\ E'_1 = c_1(t)\beta_{1I}S_1I_1/N_1 + c_1(t)\beta_{1E}S_1E_1/N_1 - \sigma E_1 - d(t)E_1/N_1, \\ I'_1 = \sigma E_1 - (\alpha + \gamma)I_1, \\ R'_1 = \gamma I_1 - d(t)R_1/N_1, \\ H'_1 = \sigma E_1, \quad D'_1 = \alpha I_1, \\ S'_2 = -c_2(t)\beta_{2I}S_2I_2/N_2 - c_2(t)\beta_{2E}S_2E_2/N_2 + d(t)S_1/N_1, \\ E'_2 = c_2(t)\beta_{2I}S_2I_2/N_2 + c_2(t)\beta_{2E}S_2E_2/N_2 - \sigma E_2 + d(t)E_1/N_1, \\ I'_2 = \sigma E_2 - (\alpha + \gamma)I_2, \\ R'_2 = \gamma I_2 + d(t)R_1/N_1, \\ H'_2 = \sigma E_2, \quad D'_2 = \alpha I_2. \end{cases} \quad (1)$$

为了刻画放开离鄂通道交通管制措施以后, 从湖北流出的无症状感染者对输入地感染人数的影响, 我们用 $H^0(t)$ 表示不允许返程情况下, t 时刻六省二市的其中一个地区的累计感染人群数量; $H^{T_0}(t)$ 为在 T_0 时刻允许返程之后, t 时刻六省二市的其中一个地区的累计感染人群数量. 因此, 在 T_0 时刻允许返程后, 从湖北省迁移到六省二市的其中一个地区的累计感染人数计算公式为

$$H_B(T_0) = H^{T_0}(T_0 + T_1) - H^0(T_0 + T_1). \quad (2)$$

我们使用如下 3 个数据来源: 2020 年 1 月 20 日至 3 月 4 日国家卫生健康委员会公布的湖北、浙江、广东、河南、湖南、江西、安徽、北京和上海等七省二市确诊人数、因病死亡人数、痊愈人数^[2]; 国家统计局公布的人口数据; 通过大数据方法获取的人口迁徙数据^[6]. 在上面的模型中, 易感人群 S 被无症状感染者 E 和有症状感染者 I 感染, 可能变成无症状感染者, 感染率分别为 β_{iE} 和 β_{iI} , 这是我们需要估计的参数. 我们基于 2020 年 1 月 21 日至 2020 年 3 月 5 日累积确诊人数数据, 使用 MCMC 方法估计. 无症状感染者 E 在表现出明显症状后就发展为感染者 I , 潜伏期长度为 $1/\sigma$. 我们根据文献^[7], 取潜伏期 $\sigma = 5.2$ 天. 有症状感染者 I 可能自愈或者治愈变成痊愈者 R , 恢复率为 γ . 新型冠状病毒患者从出现症状到入院就诊的时间平均为 2.7 天^[8], 从住院到出院的平均时间为 10 天^[9]. 因此, 恢复期的时间长度 $\gamma = 12.7$ 天. 但也可能因病导致死亡, 因病死亡率为 α_i . 另外, 参数 $c_i(t) \in [0, 1]$ 表示由于人类对流行病的反应和干预措施 (例如戴口罩、隔离、交通管制) 导致传播率降低. 全国一盘棋的联防联控措施从 1 月 23 日开始实施. 基于对湖北和其它六省二市每天新增病例数据分析, 我们认为, 联防联控机制在湖北以外地区, 7 天后可以慢慢发挥作用; 在湖北地区, 至少要在 11 天后才会慢慢体现效果. 因此, 我们假设 $c_2(t)$ 和 $c_1(t)$ 分别满足

$$c_2(t) = \begin{cases} 1, & 1 \text{ 月 } 30 \text{ 日之前;} \\ \exp[\ln(c \min_2)t], & 1 \text{ 月 } 30 \text{ 日到 } 2 \text{ 月 } 3 \text{ 日之间;} \\ c \min_2, & 2 \text{ 月 } 3 \text{ 日之后,} \end{cases} \quad (3)$$

和

$$c_1(t) = \begin{cases} 1, & 2 \text{ 月 } 3 \text{ 日之前;} \\ \exp[\ln(c \max_1)t], & 2 \text{ 月 } 3 \text{ 日到 } 2 \text{ 月 } 8 \text{ 日之间;} \\ c \min_1, & 2 \text{ 月 } 8 \text{ 日之后.} \end{cases} \quad (4)$$

我们使用 MCMC 方法估计得 $c \min_2 = 0.052$ 和 $c \min_1 = 0.11$.

湖北到的六省二市的其中一个地区每天迁入人口 $d(t)$ 的计算: 我们根据 2020 年 1 月 10 日至 1 月 24 日期间由武汉市迁入浙江、广东、河南、湖南、江西、安徽、北京和上海等六省二市的人数, 估算放开离鄂通道交通管制措施后, 每天由湖北省迁入六省二市的人数. 例如武汉市 1 月 10 日到 1 月 24 日迁入浙江省的人口总数为 92,559 人, 武汉市平均每天有 6,171 人进入浙江. 武汉市常住人口总数为 1,108 万, 湖北省常住人口总数为 5,917 万, 从而允许返程后湖北省迁入浙江迁徙量

$$d = 32,953(\text{人/天}).$$

类似的, 我们估算一旦放开离鄂通道交通管制措施后, 每天由湖北迁入广东、河南、湖南、江西、安徽、北京和上海的人数分别为 81,851、339,290、193,560、98,401、104,950、77,186、58,003、81,851、339,290、193,560、98,401、104,950、77,186、58,003 人.

§3. 联防联控机制的效果评价

新型冠状病毒肺炎疫情的重要特点之一是无症状感染者具备传染能力, 且无症状感染者的潜伏期较长^[7,10]. 我们利用以上扩展模型评价联防联控机制的效果, 估计无症状感染者的人数, 并预测一旦放开离鄂通道交通管制措施以后, 从湖北流出的无症状感染者对输入地感染人数的影响. 具体地, 我们采用基本再生数^[11-13]来评估全国一盘棋的联防联控机制的效果. 基本再生数 R_0 是指一个感染者在感染期内所能感染的平均人数^[11-13]. 这是控制传染病传播的一个重要指标. 通过使用再生矩阵的方法, 我们得到了具有如下具有控制措施的基本再生数

$$R_{0i}^c = \frac{c\beta_{iE}}{\sigma} + \frac{c\beta_{iI}}{\alpha + \gamma}, \quad i = 1, 2, \quad (5)$$

其中 $i = 1$ 表示湖北省, $i = 2$ 表示六省二市的其中一个地区.

继湖北在 2020 年 1 月 23 日启动交通管制措施 (武汉率先宣布“封城”) 后, 全国各地陆续启动了联防联控机制. 联防联控机制对于疫情防控发挥作用会有约 2 周时间的滞后效应. 2020 年 2 月 3 日, 湖北省的确诊感染人数每天都呈现快速增长趋势, 从 1 月 20 日的 270 人快速增加到 2 月 3 日的 16,678 人. 其中, 2 月 3 日当天确诊 3,156 人. 2 月 4 日, 湖北省的确诊人数增幅首次缩小, 当天确诊 2,987 人, 较前一日减少 169 人. 全国其余地区基本类似. 总体而言, 2 月初后, 全国疫情紧张形势初步得到缓解.

我们采用基本再生数^[11-13]来评估全国一盘棋的联防联控机制的效果. 基本再生数描述一个传染源在不施加控制的情形下, 一个感染者在感染周期内可以感染易感人群的数量, 是制定公共卫生政策重要参考依据. 我们通过再生矩阵得到湖北和浙江基本再生数公式 (5) 计算得到湖北基本再生数的平均值从 2020 年 2 月 3 日之前的 3.86 逐渐降为 2 月 8 日之后的 0.42. 相对于湖北来说, 浙江、广东、河南、湖南、江西、安徽、北京和上海等六省二市的确诊人数不多, 联防联控机制更容易见效. 这些地区的基本再生数的平均值从 2020 年 1 月 30 日之前的 3.68 降为 2 月 4 日之后的 0.18. 上述所有七省二市的基本再生数全部降到 1 以下. 这足以说明中国政府采取的全国一盘棋的联防联控机制已经对新冠肺炎疫情防控起到了非常显著的效果.

§4. 无症状感染者人群数量

新型冠状病毒肺炎疫情防控的难点在于及时隔离和收治无症状感染者, 并提高无症状感染者的收治率. 尽管第五版和第六版《新型冠状病毒感染的肺炎诊疗方案》都出“无症状感染者也可能成为传染源”, 但是, 一直没有量化方法去对比评估无症状感染者和有症状感染者的感染力. 无症状感染者由于没有表现出明显的临床症状. 因此, 甄别无症状感染者非常困难. 如果全民采用核酸检测的话, 则花费巨大. 无症状感染者的潜伏期比较长, 平均潜伏期为 5–6 天 (范围为 1–14 天)^[7].

我们使用扩展以后的 SEIR-两斑块传播动力学模型, 计算了无症状感染者和有症状感染者的感染力. 计算结果见表 1 中. 无症状感染者在潜伏期的感染力和有症状感染者在确诊之前的感染力几乎没有明显差别, 尽管无症状感染者在潜伏期的感染力甚至还略微大一点点. 在湖北以外地区, 有症状感染者可以得到及时确诊、及时救治; 在湖北尤其是武汉地区, 有症状感染者在表现出明显症状后, 平均要等 5 天才能得到确诊.

表 1 无症状感染者在潜伏期的感染力和有症状感染者在确诊前的感染力

省份	湖北	浙江	广东	河南	湖南	江西	安徽	北京	上海
无症状	0.22	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21
有症状	0.21	0.20	0.20	0.21	0.20	0.21	0.21	0.20	0.20

另外我们估计了 2020 年 1 月 20 日至 2 月 22 日期间, 七省两市无症状感染者人数. 这也可以用来评估目前疫情防控措施效果并预测疫情走势. 由于湖北的无症状感染者人数显著多于其他六省二市, 因此, 我们将湖北的无症状感染者人数单列在图 1 的左边. 湖北省的无症状感染者人数一直维持在较高水平, 在 2 月 5 日前后达到顶峰, 超过 2 万人; 但是, 2 月 12 日一天湖北省确诊肺炎病例 14,840 例, 大量感染者得到确诊. 传播动力学模型显示, 2 月 5 日之后, 无症状感染者的人数一直在减少, 这显示联防联控机制起到了非常明显的效果. 但是, 模型也显示, 2 月 29 日, 湖北地区还有 2,935 个无症状感染者. 这意味着湖北省的疫情防控形势依然非常严峻; 浙江、广东、河南、湖南、江西、安徽、北京和上海六省二市无症状感染者人数列在图 1 的右边. 1 月底或 2 月初, 上述六省二市无症状感染者人数已经达到顶峰, 之后无症状感染人数出现下降趋势. 2 月 29 日, 这些地区的无症状感染者人数已经落到 5 ~ 21 人之间. 提示, 除湖北省以外的其他地区新型冠状病毒肺炎疫情已经得到了有效控制.

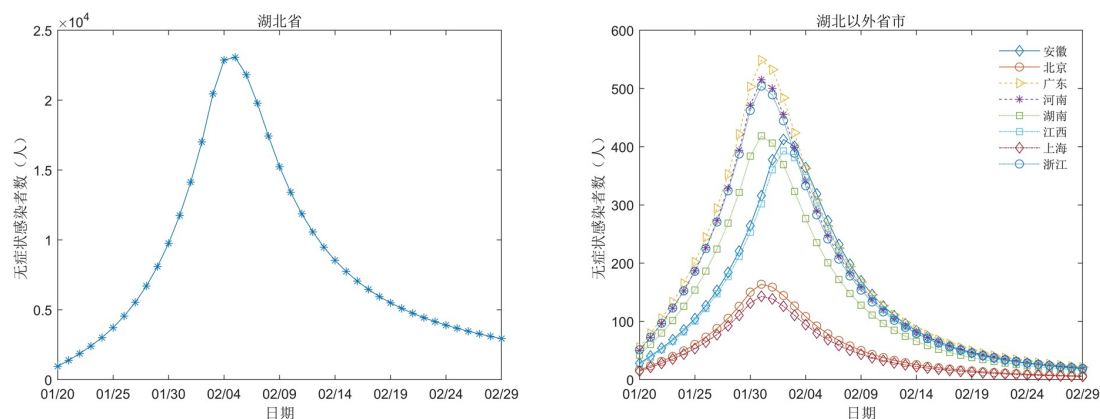


图 1 湖北省以及其余六省二市每天的无症状感染者人数

§5. 开放离鄂通道的影响预测

在目前的联防联控机制下,截至2020年2月29日,湖北累计确诊病例66,907例,占到全国的83.6%。一旦放开离鄂通道交通管制措施(完全或者逐步放开民航、铁路、公路、水路客运等外出通道),大量无症状人群势必将由湖北输入京津冀、长三角、珠三角以及湖北周边省份。无症状人群包括易感人群中的健康人群、无症状感染者及痊愈人群。其中,无症状感染者流入其他地区势必会导致输入地感染人数增加。我们基于扩展以后的SEIR-两斑块传播动力学模型,从两个不同的角度,来量化评价返程复工人员对输入地感染人数的影响。

我们首先根据2020年1月10日至1月24日期间由武汉市迁入浙江、广东、河南、湖南、江西、安徽、北京和上海等六省二市的人数,估算了一旦放开离鄂通道交通管制措施后,每天由湖北省迁入六省二市的人数分别为32,953人、81,851人、339,290人、193,560人、98,401人、104,950人、77,186人、58,003人。在传播动力学模型中,我们假设放开离鄂通道交通管制措施的时间分别选择在3月15日、4月15日、5月15日或6月15日。在放开离鄂通道交通管制措施后,输入地的感染人数呈现逐渐增加。因此,我们利用模型来预测,在不同时间点放开离鄂通道交通管制措施一个半月后,输入地增加的感染人数。

表2 无症状感染者在潜伏期的感染力和有症状感染者在确诊前的感染力

时间	浙江	广东	河南	湖南	江西	安徽	北京	上海
3月中旬	30.3	73	269.5	164.6	88.2	93.3	70.5	53
4月中旬	7.2	17.4	64	39.1	20.9	22.2	16.7	12.6
5月中旬	1.8	4.3	16	9.7	5.2	5.5	4.1	3.1
6月中旬	0.4	1	3.8	2.3	1.2	1.3	1.0	0.7

在上述六省二市中,河南和湖南离湖北省相对最近。一旦放开离鄂通道交通管制措施,湖北流出的无症状人群对河南和湖南构成疫情防控压力将是相对较大的。

值得指出的是,我们基于2020年1月10日至1月24日期间由武汉市迁入浙江、广东、河南、湖南、江西、安徽、北京和上海等六省二市的人数,来估算湖北省在放开离鄂通道交通管制措施以后,每天由湖北迁入上述六省二市的人数。这个估算可能是很不准确的。因为一旦放松交通管制措施以后,湖北地区大量无症状人员可能都会输入到全国其他地方,寻求优质医疗资源和工作机会。因此,我们有必要从一个不同的角度来评估返程复工人流对输入地感染人数的影响。

我们依然假设湖北放开离鄂通道交通管制措施的时间分别选择在3月15日、4月15日、5月15日或者6月15日,基于传播动力学模型,预测放开离鄂通道交通管制措施的一个半月后,输入地增加的感染人数。扩展以后的SEIR-两斑块传播动力学发现,如果在5月中旬或6月中旬放松离鄂通道交通管制措施,允许每天从湖北输入10万无症状人群到浙

江、广东、河南、湖南、江西、安徽、北京和上海等六省二市, 则一个半月后输入地感染人数将累计增加 5.5 人或 1.3 人. 但如果选择在 3 月中旬或 4 月中旬放松离鄂通道交通管制措施, 一个半月以后输入地感染人数将累计增加 93 人或 22 人.

上述模型分析从两个不同的角度来说明, 保持目前的交通管制措施对于疫情控制非常有效的, 越晚放松离鄂通道交通管制, 对其他省份疫情防控构成的压力会越小, 但各地承受的经济损失就会越来越大. 因此, 我们必须小心权衡疫情防控和经济发展之间的关系.

另外需要指出的是, 我们使用的传播动力学模型没有考虑天气变化、人群的免疫水平等的影响. 随着气温升高, 紫外线增强, 病毒生存环境逐步恶化; 疫情持续, 人群对其免疫水平逐步提高, 病毒传播力降低, 这均有助于疫情防控.

§6. 结论与建议

目前全国采取的联防联控机制对于疫情防控是卓有成效的. 除湖北以外, 我们选择的六省二市涉及京津冀、长三角、珠三角及湖北周边地区, 是湖北流动人口主要迁入地. 这些区域从 2 月份开始, 基本再生数都出现了大幅度下降, 无症状感染者人数增幅也在逐渐降低, 显示新冠肺炎疫情正在逐步得到控制.

新型冠状病毒的平均潜伏期为 5–6 天^[7], 最长不超过 14 天. 根据《国际卫生条例》, 自最后一个病例在两次检测中呈阴性后的 2 倍最长潜伏期内 (即 28 天), 不再出现新的诊断病例, 才可以确认解除疫情. 我们建议, 在各自辖区内最后一个病例在确诊后 1 倍最长潜伏期内 (即 14 天) 没有新发确诊或者疑似病例, 可以逐步、有序解除防控措施, 实现解除疫情的最终目标. 具体而言,

1. 除湖北外各省逐步、有序放开辖区内防控措施. 优先放开连续 14 天没有新发病例的市、区防控措施, 准许人员内部流动; 逐步过渡到整个辖区;
2. 除湖北外各省在连续 14 天没有新发病例的前提下, 可以逐步、有序地放开各省之间的交通管制措施, 组织开展生产、生活活动, 恢复正常社会秩序;
3. 除湖北外各省省际交通管制措施放松后, 如连续 14 天无新发病例, 可以逐步、有序开放与湖北省际交通, 准许湖北无症状人群逐步、有序进入其他省份.

参 考 文 献

- [1] HUANG C L, WANG Y M, LI X W, et al. Clinical features of patients infected with 2019 novel coronavirus in Wuhan, China [J]. *The Lancet*, 2020, **395**(10223): 497–506.
- [2] NATIONAL HEALTH COMMISSION OF THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA. Covid-19 [OL]. <http://www.nhc.gov.cn/>. Accessed March 6th, 2020.
- [3] ALLEN L J S, BOLKER B M, LOU Y, et al. Asymptotic profiles of the steady states for an SIS epidemic patch model [J]. *SIAM J Appl Math*, 2007, **67**(5): 1283–1309.

- [4] MURRAY J D. *Mathematical Biology: I. An Introduction* [M]. 3rd ed. New York: Springer-Verlag, 2002.
- [5] SONG P F, LOU Y, XIAO Y N. A spatial SEIRS reaction-diffusion model in heterogeneous environment [J]. *J Differential Equations*, 2019, **267**(9): 5084–5114.
- [6] BAIDU INC. Baidu migration [OL]. <http://qianxi.baidu.com/>. Accessed March 6th, 2020.
- [7] BACKER J A, KLINKENBERG D, WALLINGA J. The incubation period of 2019-nCoV infections among travellers from Wuhan, China [OL]. <https://doi.org/10.1101/2020.01.27.20018986>, 2020.
- [8] LINTON N M, KOBAYASHI T, YANG Y C, et al. Incubation period and other epidemiological characteristics of 2019 novel coronavirus infections with right truncation: a statistical analysis of publicly available case data [OL]. <https://doi.org/10.1101/2020.01.26.20018754>, 2020.
- [9] WANG D W, HU B, HU C, et al. Clinical characteristics of 138 hospitalized patients with 2019 novel coronavirus-infected pneumonia in Wuhan, China [J]. *JAMA*, 2020, **323**(11): 1061–1069.
- [10] KUPFERSCHMIDT K. Study claiming new coronavirus can be transmitted by people without symptoms was flawed [OL]. <https://www.sciencemag.org/news/2020/02/paper-non-symptomatic-patient-transmitting-coronavirus-wrong>. Accessed March 6th, 2020.
- [11] ANDERSON R M, MAY R M. *Infectious Diseases of Humans: Dynamics and Control* [M]. New York: Oxford University Press, 1991.
- [12] DIEKMANN O, HEESTERBEEK J A P, METZ J A J. On the definition and the computation of the basic reproduction ratio R_0 in models for infectious diseases in heterogeneous populations [J]. *J Math Biol*, 1990, **28**(4): 365–382.
- [13] DIEKMANN O, HEESTERBEEK J A P. *Mathematical Epidemiology of Infectious Diseases: Model Building, Analysis and Interpretation* [M]. Chichester: Wiley, 2000.

Assessing Effectiveness of Integrated Strategies for Preventing and Controlling the Outbreak of COVID-19, and Predicting Impact of Opening Exit Channels to Leave Hubei Province

SONG Pengfei

(Xi'an Jiaotong University, Department of mathematics and statistics, Xi'an, 710049, China)

CHEN Canyi

(Institute of Statistics and Big Data, Renmin University of China, Beijing, 100872, China)

LOU Yuan

(The Ohio State University, Department of Mathematics, Columbus, Ohio, 43210, USA)

JIANG Hui

(Beijing Chest Hospital, Capital Medical University, Beijing, 101149, China)

LI Weimin

(Beijing Chest Hospital, The Drug-Resistant TB Key Laboratory of Beijing, Capital Medical University, Beijing, 101149, China)

(Beijing Municipal Key Laboratory of Clinical Epidemiology, School of Public Health, Capital Medical University, Beijing, 100069, China)

ZHU Liping

(Institute of Statistics and Big Data, The National Academy of Development and Strategy, Renmin University of China, Beijing, 100872, China)

Abstract: Using the transmission dynamics model, the number of confirmed cases, cured cases and dead cases announced by the National Health Commission, we got the following three conclusions: First, the joint prevention and control mechanism adopted by the Chinese government has played a very significant role in the prevention and control of Corona virus diseases 2019 (COVID-19). The basic regeneration number (R_0) in Hubei province has gradually decreased from 3.86 before February 3 to 0.42 after February 8; and R_0 of Zhejiang province, Guangdong province, Henan province, Hunan province, Jiangxi province, Anhui province, Beijing city and Shanghai city (six provinces and two cities) decreased from 3.68 before January 30 to 0.18 after February 4. Second, the infectivity of asymptomatic and symptomatic cases was almost the same before confirmed diagnosis. The difficulty in the prevention and control of the COVID-19 lies in the isolation and timely treatment of asymptomatic cases. Although the number of asymptomatic cases in Hubei province has gradually dropped from 23,068 to 2,935 on February 29, the situation of epidemic prevention and control in Hubei province remains very grim. The number of asymptomatic cases in six provinces and two cities has fallen to between 5 and 21 on February 29, and the epidemic of COVID-19 in these regions has been effectively controlled. Third, selecting the time to relax traffic control measure in Hubei province requires caution. The transmission dynamic model predicts that if the traffic control measures are lifted in mid-May or mid-June, and approximately 100,000 asymptomatic cases are allowed to be imported from Hubei province to six provinces and two cities, the cumulative number of infected people will increase by 5.5 or 1.3 after 1.5 months. However, if the traffic control measures are lifted in mid-March or mid-April, the cumulative number of infected people will increase by 93 or 22 after 1.5 months.

Keywords: COVID-19; SEIR model; basic reproducing number; latent infection; prediction

2010 Mathematics Subject Classification: 34C29