基于人口流动数据研究武汉“封城”对中国 2019冠状病毒病疫情态势的影响

王思聪^{1,2}, 叶元庆^{1,2,3}, 胡可嘉^{1,2}, 雷浩^{1,2}, 陈辰^{1,2}, 徐小林^{1,2}, 李文渊^{1,2},
袁长征^{1,2}, 曹淑殷^{1,2}, 王思思^{1,2}, 李舒^{1,2}, 贾君麟^{1,2}, 王秦川⁴, 卞子龙^{1,2},
吴息凤^{1,2,3}

1. 浙江大学医学院附属第二医院生物统计、生物信息学和大数据中心, 浙江 杭州 310009
2. 浙江大学医学院公共卫生学院大数据健康科学系, 浙江 杭州 310058
3. 浙江大学健康医疗大数据国家研究院, 浙江 杭州 310058
4. 浙江大学医学院附属邵逸夫医院肿瘤外科, 浙江 杭州 310016

[摘要] 目的: 定量评估武汉“封城”对控制中国2019冠状病毒病(COVID-19)疫情传播的作用。方法: 首先基于全国217个城市的武汉来源输入性病例数据和武汉来源的人口流动数据, 估算武汉2020年1月23日“封城”前的每日新发感染率。并假设武汉“封城”推迟7 d, 武汉的每日新发感染率在2020年1月23日后分别呈高、中、低增长趋势, 估算2020年1月24至30日的每日新发感染率, 从而计算在此期间武汉流出的感染人数。最后, 通过易感-暴露-感染-恢复(SEIR)模型预测武汉“封城”推迟7 d对国内疫情发展可能造成的影响。结果: 2020年1月19至23日, 武汉每日新发感染率分别为0.021%、0.026%、0.029%、0.033%和0.070%。截至2020年1月23日, 武汉共有感染者20 066人。假设武汉“封城”推迟7 d, 在2020年1月30日, 武汉每日新发感染率在高、中、低增长情景模拟的结果分别是0.335%、0.129%和0.070%。依据上述三种情景, 预测分别会有32 075、24 819和20 334名感染者从武汉流入其他地区, 到2020年3月19日, 全国COVID-19确诊人数将是官方公布数据的3.3~3.9倍。结论: 在疫情暴发早期, 武汉及时采取“封城”措施对控制COVID-19疫情在中国的传播具有重要意义。

[关键词] 2019冠状病毒病; 中国; 人口流动; 非药物干预; 易感-暴露-感染-恢复模型; 疫情播散

[中图分类号] R181.2 **[文献标志码]** A

收稿日期: 2020-12-04 接受日期: 2021-01-06

基金项目: 浙江大学新型冠状病毒(2019-nCoV)肺炎应急科研专项(2020XGZX003); 浙江省创新团队(2019R01007); 浙江省重点实验室(2020E10004); 浙江省自然科学基金(LEZ20H260002)

第一作者: 王思聪, 博士研究生, 主要从事健康医疗大数据研究; E-mail: wangsicong@zju.edu.cn; <https://orcid.org/0000-0002-5814-204X>。叶元庆, 研究员, 博士生导师, 主要从事遗传流行病学研究; E-mail: yuanqing99@zju.edu.cn; <https://orcid.org/0000-0001-5708-8961>。胡可嘉, 讲师, 主要从事环境流行病学研究; E-mail: kejiahu@zju.edu.cn; <https://orcid.org/0000-0002-1175-3580>。

通信作者: 吴息凤, 教授, 博士生导师, 主要从事肿瘤分子流行病学和健康医疗大数据研究; E-mail: xifengw@zju.edu.cn; <https://orcid.org/0000-0003-2980-8129>

Impact of Wuhan lockdown on the spread of COVID-19 in China: a study based on the data of population mobility

WANG Sicong^{1,2}, YE Yuanqing^{1,2,3}, HU Kejia^{1,2}, LEI Hao^{1,2}, CHEN Chen^{1,2}, XU Xiaolin^{1,2}, LI Wenyuan^{1,2}, YUAN Changzheng^{1,2}, CAO Shuyin^{1,2}, WANG Sisi^{1,2}, LI Shu^{1,2}, JIA Junlin^{1,2}, WANG Qinchuan⁴, BIAN Zilong^{1,2}, WU Xifeng^{1,2,3} (1. Center for Biostatistics, Bioinformatics and Big Data, the Second Affiliated Hospital, Zhejiang University School of Medicine, Hangzhou 310009, China; 2. Department of Big Data in Health Science, School of Public Health, Zhejiang University School of Medicine, Hangzhou 310058, China; 3. National Institute for Data Science in Health and Medicine, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 4. Department of Surgical Oncology, Sir Run Run Shaw Hospital, Zhejiang University School of Medicine, Hangzhou 310016, China)

WANG Sicong, YE Yuanqing and HU Kejia contributed equally to this article.

Corresponding author: WU Xifeng, E-mail: xifengw@zju.edu.cn, <https://orcid.org.cn/0000-0003-2980-8129>

[Abstract] **Objective:** This study aimed to quantitatively assess the effectiveness of the Wuhan lockdown measure on controlling the spread of coronavirus disease 2019 (COVID-19). **Method:** Firstly, estimate the daily new infection rate in Wuhan before January 23rd, 2020 when the city went into lockdown by consulting the data of Wuhan population mobility and the number of cases imported from Wuhan in 217 cities of Mainland China. Then estimate what the daily new infection rate would have been in Wuhan from January 24th to January 30th if the lockdown measure had been delayed for 7 days, assuming that the daily new infection in Wuhan after January 23rd increased in a high, moderate and low trend respectively (using exponential, linear and logarithm growth models). Based on that, calculate the number of infection cases imported from Wuhan during this period. Finally, predict the possible impact of 7-day delayed lockdown in Wuhan on the epidemic situation in China using the susceptible-exposed-infectious-removed (SEIR) model. **Results:** The daily new infection rate in Wuhan was estimated to be 0.021%, 0.026%, 0.029%, 0.033% and 0.070% respectively from January 19th to January 23rd. And there were at least 20 066 infection cases in Wuhan by January 23rd, 2020. If Wuhan lockdown measure had been delayed for 7 days, the daily new infection rate on January 30th would have been 0.335% in the exponential growth model, 0.129% in the linear growth model, and 0.070% in the logarithm growth model. Correspondingly, there would have been 32 075, 24 819 and 20 334 infection cases travelling from Wuhan to other areas of Mainland China, and the number of cumulative confirmed cases as of March 19th in Mainland China would have been 3.3-3.9 times of the officially reported number. **Conclusions:** Timely taking city-level lockdown measure in Wuhan in the early stage of COVID-19 outbreak is essential in containing the spread of the disease in China.

[Key words] Coronavirus disease 2019; China; Human mobility; Non-pharmaceutical interventions; Susceptible-exposed-infectious-recovered model; Epidemic spread

[缩略语] 2019冠状病毒病(coronavirus disease 2019, COVID-19); 易感-暴露-感染-恢复(susceptible-exposed-infectious-recovered, SEIR)

根据世界卫生组织报告,截至2020年11月22日,COVID-19疫情蔓延至全球216个国家和地区,已导致超过8800万人感染,190万人死亡^[1]。为减缓这一疫情,许多国家和地区实施了空前的非药物干预措施,如隔离确诊患者及其密切接触者、关闭学校等公共场所、限制或停止集市聚会、限制交通运输,以及发布国内和国际旅行禁令等。2020年1月23日,作为COVID-19疫情的重灾区,武汉实施了“封城”。武汉的严格防控虽然取得了成功,但鲜有研究从控制疫情规模方面定量评估“封城”减缓COVID-19疫情在中国播散中的作用。

要评估武汉“封城”减缓COVID-19疫情在中国播散的作用,前提是要了解疫情早期武汉的疫情规模,尤其是确诊患者和无症状感染者数量。但由于早期无法快速和广泛地进行COVID-19检测,这一时期感染确诊患者数量可能被低估。学者们已发表多项基于人口流动数据和确诊病例数据来估算COVID-19感染率和感染人数的研究^[2-9],但均存在局限性。首先,基于移动电话定位服务、手机信号、国际航空乘客数据等信息可能并没有覆盖全人群。其次,武汉的感染率通常根据其他城市来自武汉的流动人口数和这些城市的总病例数来推断^[8],但是这种方法并没有将输入

性病例从总病例数中区分出来。而且,有些研究在估算的过程中只考虑了潜伏期,忽略了从发病到确诊这段时间^[9]。在早期,发病却未确诊的患者可能没有被隔离,其仍可能感染易感人群。所以在评估疫情规模时,有必要将这一时间段也考虑在内。

本研究以武汉迁移至全国217个城市的人口流动数据为基础,根据覆盖率对人口流动数据进行校准;同时结合这些城市武汉来源的确诊病例数来估算武汉市每日新增感染率。同时,考虑了发病和确诊的时间间隔。最后,运用SEIR模型评估武汉“封城”减缓COVID-19疫情播散的作用。

1 资料与方法

1.1 数据来源

武汉于2020年1月23日实施“封城”,假设潜伏期为5 d^[10],本研究收集了2020年1月19日以来武汉迁移到其他城市的人口流动数据,见图1。对全国共333个地级行政区(除香港、澳门、台湾地区)官方报道的疫情数据进行检索,共有217个城市(湖北省外)对确诊病例的流行病历史有详细的官方报道。假设发病至确诊有5 d的间隔^[11],共收集217个城市2020年1月29日至2月2日武汉来源的确诊病例数。COVID-19每日确诊病例数

图1 武汉至217个城市每日人口流动数与武汉来源2019冠状病毒病输入病例数

Figure 1 Daily population number moved from Wuhan to selected 217 cities and daily confirmed COVID-19 cases imported from Wuhan

据来自国家卫生健康委员会和各省、市卫生健康委员会官方网站。人口流动数据来源于百度公司提供的定位系统(<https://huiyan.baidu.com/>),利用覆盖率对人口流动数据进行校准。2020年1月23至27日,定位系统收集到的湖北省流动到浙江省温州市的流动人数为4300人,温州市政府排查的数据显示,同时间段内有湖北省旅行史的人数为18800人,从而推断定位系统数据的覆盖率为22.87%。为验证覆盖率值估算的可靠性,我们同时利用文献中疫情期间两大手机运营商提供的12个省市的人口移动数据^[8]和同期百度迁徙(<http://qianxi.baidu.com/>)提供的推算出百度人口流动数据的覆盖率为24.78%,与采用温州数据估算的覆盖率接近,说明覆盖率估算结果基本可靠。考虑到春节对人口流动的影响,假设如果武汉未实施封城,其2020年1月23日至2月2日人口流动状况与2019年农历同期(即2019年2月3至13日)保持一致。

1.2 武汉每日新发感染率和感染人数估算方法

假设所有感染者感染到确诊的时间间隔为10 d(包括潜伏期5 d^[9]、从出现症状到确诊的时间间隔5 d^[10]),且感染者出现症状就不离开武汉。2020年1月19至23日武汉的每日新发感染率计算公式如下:

$$R_k = \frac{CR \times C_{k+10}}{\sum_{t=k}^{23} N_t} (k = 19, 20, \dots, 23)$$

k 为2020年1月的日期, R_k 是2020年1月 k 日的新发感染率, CR 是百度迁徙提供的人口流动数据的覆盖率, C_{k+10} 表示217个城市 $k+10$ 日武汉来源新增确诊病例数, N_t 是百度公司提供的 t 日217个城市的来自武汉的流动人口数。

根据国家统计局(<http://tjj.wuhan.gov.cn>)公布的2019年人口统计数据,设定武汉市的常住人口为1121万,2020年1月19至23日武汉市每日新发感染人数即为 R_k 和武汉市常住人口的乘积。

1.3 武汉输出的新发感染人数估算方法

首先,基于估算的武汉每日新增感染率,采用指数(高增长)、线性(中增长)和对数(低增长)三种模型,预测高、中、低增长三种情景下2020年1月24至30日武汉每日新增感染率,并估算这段时期从武汉流入全国除武汉、全国除湖北省、湖北省除武汉的感染人数,计算公式为:

如果武汉2020年1月23日实施“封城”,

$$I_k = \frac{R_k \times \sum_{t=k}^{23} M_t}{CR} (k = 19, 20, \dots, 23)$$

如果武汉2020年1月30日实施“封城”,

$$I_k = \frac{R_k \times \sum_{t=k}^{k+4} M_t}{CR} (k = 19, 20, \dots, 25)$$

$$I_k = \frac{R_k \times \sum_{t=k}^{30} M_t}{CR} (k = 26, 27, \dots, 30)$$

k 是2020年1月的日期, I_k 是2020年1月 k 日武汉流入其他城市的感染人数, R_k 是武汉 k 日的每日新发感染率, M_t 是 t 日从武汉去往其他城市的人数, CR 是百度迁徙提供的人口流动数的覆盖率。

1.4 全国病例数预测方法

基于估算的武汉输出感染人数和官方报道的COVID-19疫情数据,假设武汉在2020年1月30日开始实施“封城”,通过SEIR模型模拟2020年1月29日至3月19日全国COVID-19累计确诊病例数,基本模型如下:

$$S(t+1) = S(t) - \frac{\beta(t)[I(t)+E(t)+I_{im}(t)]S(t)}{N}$$

$$E(t+1) = E(t) + \frac{\beta(t)[I(t)+E(t)+I_{im}(t)]S(t)}{N} - \frac{E(t)}{k}$$

$$I(t+1) = I(t) + \frac{E(t)}{k} - \frac{I(t)}{D}$$

$$R(t+1) = R(t) + \frac{I(t)}{D}$$

$S(t)$ 、 $E(t)$ 、 $I(t)$ 和 $R(t)$ 分别代表在 t 日易感者、暴露者、感染者和恢复者的人数, $\beta(t)$ 指在 t 日随时变化的感染率。 N 指人口数,尽管在本研究的时间段里有人口流动,但是和常住人口数1121万相比很小,因此假设 N 为常数。 k 和 D 分别是潜伏期和发病到诊断的时间间隔,如上所述,假设 $k=5$ d, $D=5$ d。COVID-19的再生数 $R_t=\beta(t)(D+k)$ 。 $I_{im}(t)$ 是 t 日的输入性病例数。本研究假设2020年1月28日至2月3日 R_t 为2.2^[12];2020年2月3日之后,根据确诊病例数,用最大似然估计法来推测 R_t ,全国除武汉、全国除湖北省、湖北省除武汉 R_t 估算值分别为0.46、0.26、0.55。以2月3日为节点[因为武汉“封城” $(D+k)$ d之后病例数的增幅会减小],通过SEIR模型模拟全国除湖北省累计确诊总病例数,并与国家卫生健康委员会报道的累计确诊病例数进行比较从而确定模型的稳健性。同时,通过SEIR模型模拟武汉“封城”推迟7 d时全国除武

汉、全国除湖北省和湖北省除武汉的累计确诊病例数,设 R_t 在2020年1月28日至2月10日为2.2,2020年2月10日之后分别为0.46、0.26和0.55。

2 结果

2.1 武汉每日新发感染率和感染人数估算结果

2020年1月19至23日,共有1 149 147人从武汉迁移至本研究所纳入的217个城市。这217个城市2020年1月29日至2月2日武汉来源输入性病例数分别为246、254、217、163、160例,共1040例(附表1)。估算2020年1月19至23日武汉每日新发感染率分别为0.021%、0.026%、0.029%、0.033%、0.070%(图2)。截至2020年1月23日估算武汉市至少有20 066例感染者。

2.2 武汉输出的新发感染人数估算结果

如果武汉“封城”推迟7 d,基于三种模型模拟,2020年1月30日武汉每日新发感染率分别是0.335%、0.129%、0.070%;2020年1月19至30日离开武汉至全国除湖北省的COVID-19感染人数分别为9688、7192和5739例,流入至湖北省除武汉的COVID-19感染人数分别为22 388、17 628、14 596例,流入至全国除武汉的感染人数分别为32 075、24 819和20 334例(图3,附表2)。

2.3 全国病例数预测结果

SEIR模型预测的累计确诊病例数与官方报道的病例数接近(图4),显示SEIR模型具有较好的预测效果。假设武汉“封城”推迟7 d,SEIR模型模拟2020年1月28日至3月19日COVID-19在国内的流行情况见图5。基于如前所述的三种模型,截至2020年3月19日,全国除武汉COVID-19累计确诊病例数为100 898~119 778,全国除湖北省COVID-19累计确诊病例数为41 389~47 268,湖北省除武汉COVID-19累计确诊病例数为61 569~74 698。即如果武汉“封城”推迟7 d,全国除武汉COVID-19累计确诊病例数将增加至现在的3.3~3.9倍,全国除湖北省将增加至3.1~3.6倍,湖北省除武汉将增加至3.5~4.2倍。

3 讨论

本研究估计了COVID-19疫情暴发初期武汉的每日新增感染率,并预测了若武汉“封城”推迟1周全国的累计确诊病例数。研究结果显示武汉作为中国疫情中心城市,及时“封城”对控

图2 2020年1月19至30日武汉每日2019冠状病毒病新发感染率估算值及预测值

Figure 2 Estimated and prediction values of daily new infection rate and predicted daily new infection rate of COVID-19 in Wuhan from Jan 19th to Jan 30th, 2020

图3 2020年1月23日“封城”和1月30日“封城”三种新发感染率增长情景下武汉流出至其他地区的2019冠状病毒病感染人数估算值

Figure 3 The estimated number of COVID-19 new infection cases exported from Wuhan to other areas in the three trends of infection rate growth under the assumptions of Wuhan lockdown from Jan 23rd and from Jan 30th, 2020

制COVID-19疫情在中国传播具有重要作用。

既往也有研究者结合其他国家和地区的确诊病例数据和人口流动数据估算了武汉COVID-19感染率^[8-9]。如Zhao等^[9]估计,截至2020年2月2日,武汉市COVID-19感染率为1.1%。Cao等^[8]估计,截至2020年1月23日,武汉的潜在感染率

A: 全国除武汉; B: 全国除湖北省; C: 湖北省除武汉。 R^2 : 决定系数; RMSE: 均方根误差。

图4 SEIR模型模拟武汉2020年1月23日“封城”累计2019冠状病毒病确诊病例数及官方报道的累计确诊病例数

Figure 4 The cumulative number of confirmed COVID-19 cases reported by the government and the number estimated by SEIR model based on the fact that Wuhan lockdown started from Jan 23rd, 2020

A: 全国除武汉; B: 全国除湖北省; C: 湖北省除武汉。

图5 SEIR模型模拟武汉2020年1月30日“封城”累计2019冠状病毒病确诊病例数

Figure 5 The cumulative number of confirmed COVID-19 cases if Wuhan lockdown started from Jan 30th, 2020 predicted by the SEIR model

约为0.12%。但这些研究仅使用了总病例数而不是武汉来源输入性病例数,而本研究收集了全国217个城市的武汉来源输入性病例的疫情数据并进行了分析,该方法在理论上更为准确。

有研究发现,COVID-19疫情初始来自武汉的人口数与当地确诊病例数密切相关^[8,10,13-14]。然而,研究中关于武汉来源人口流动数的估算方法各不相同。例如,Fan等^[13]使用了武汉当地政府报告的500万武汉流动人口的数据,Cao等^[8]使用两大手机运营商的人口流动数据,Lai等^[3]使用百度公司定位系统提供的武汉至全国296个城市的人口流动数据,但没有考虑数据的覆盖率。本研究根据政府提供的排查数据计算了覆盖率,对百度公司提供的人口流动数据进行了校准,进一步提升了估算的准确性。

本研究中,我们估算2020年1月19至23日,武汉市COVID-19每日新发感染率为0.021%~0.070%,如果武汉“封城”推迟1周,全国除武汉的累计确诊病例数将增加至3.3~3.9倍。越来越多的证据表明,及时“封城”可以有效缓解COVID-19的传播^[15-18]。Chinazzi等^[17]发现,武汉“封城”使得全国疫情发展延迟了3~5 d,截至2020年2月中旬全球病例减少了近80%。Tian等^[18]发现,武汉“封城”可能使其他城市COVID-19疫情发展态势延迟了2.91 d。本研究共纳入217个城市,数据收集广泛并具有一定代表性;研究估计了武汉在疫情暴发初期的感染人数,这对评估武汉“封城”的影响是十分必要的,因为感染者在潜伏期并没有隔离,在封城前仍然可以离开武汉而扩大疫情规模。此外,武汉每日新增感染率和感染人数的估

算是基于覆盖率校准过的人口流动数据和武汉来源输入性病例数据,在SEIR模型中同时考虑了潜伏期和发病到诊断的时间间隔。本文资料提供了强有力的证据,表明城市及时“封城”可以有效减缓COVID-19的传播。

本研究存在一定局限性。首先,本文对COVID-19疫情传播的估计是基于SEIR模型,而对模型中的参数如 R_t 和传染时间的估计存在较大的不确定性。例如, R_t 值是在2020年1月23日武汉实施“封城”的情况下,依据除武汉以外的其他城市的疫情数据来进行估算的。如果“封城”推迟1周, R_t 可能会略高于估算值,但这个数字很难预测。其次,其他季节因素如温度和湿度对病毒传播的影响暂不清楚,因此未作考虑。此外,我们假设潜伏期和发病到确诊的时间间隔均为5 d,但由于存在个体差异,这两个时间长度在不同个体可能有所不同。

参考文献

- [1] WHO. Weekly epidemiological update-24 November 2020 [EB/OL]. [2020-11-24]. <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/situation-reports>.
- [2] WU J T, LEUNG K, LEUNG G M. Nowcasting and forecasting the potential domestic and international spread of the 2019-nCoV outbreak originating in Wuhan, China: a modelling study[J]. *Lancet*, 2020, 395(10225):689–697. DOI:10.1016/S0140-6736(20)30260-9.
- [3] LAI S, RUKTANONCHAI N W, ZHOU L, et al. Effect of non-pharmaceutical interventions to contain COVID-19 in China[J]. *Nature*, 2020,585(7825):410–413. DOI:10.1038/s41586-020-2293-x.
- [4] ZHU X, ZHANG A, XU S, et al. Spatially explicit modeling of 2019-ncov epidemic trend based on mobile phone data in mainland China[J]. *medRxiv*, 2020. DOI: 10.1101/2020.02.09.20021360.
- [5] KRAEMER M U G, YANG C H, GUTIERREZ B, et al. The effect of human mobility and control measures on the COVID-19 epidemic in China[J]. *Science*, 2020,368(6490):493–497. DOI:10.1126/science.abb4218.
- [6] ZHAO X, LIU X, LI X. Tracking the spread of novel coronavirus (2019-nCoV) based on big data[J]. *medRxiv*, 2020. DOI: 10.1101/2020.02.07.20021196.
- [7] NISHIURA H, JUNG S M, LINTON N M, et al. The extent of transmission of novel coronavirus in Wuhan, China, 2020[J]. *J Clin Med*, 2020,9(2):330. DOI: 10.3390/jcm9020330.
- [8] CAO Z, ZHANG Q, LU X, et al. Incorporating human movement data to improve epidemiological estimates for 2019-nCoV[J]. *medRxiv*, 2020. DOI: 10.1101/2020.02.07.20021071.
- [9] ZHAO H, MAN S, WANG B, et al. Epidemic size of novel coronavirus-infected pneumonia in the Epicenter Wuhan using data of five-countries' evacuation action [J]. *medRxiv*, 2020.
- [10] LIU K, AI S, SONG S, et al. Population movement, city closure in Wuhan, and geographical expansion of the COVID-19 infection in China in January 2020[J]. *Clin Infect Dis*, 2020,71(16):2045–2051. DOI: 10.1093/cid/ciaa422.
- [11] Xinhuanet. Early diagnosis, treatment lead to higher recovery rate in China [N/OL]. [2020-02-17]. http://www.xinhuanet.com/english/2020-02/17/c_138791923.htm.
- [12] LI Q, GUAN X, WU P, et al. Early transmission dynamics in Wuhan, China, of novel coronavirus-infected pneumonia[J]. *N Engl J Med*, 2020, 382(13):1199–1207. DOI:10.1056/NEJMoa2001316.
- [13] FAN C, LIU L, GUO W, et al. Prediction of epidemic spread of the 2019 novel coronavirus driven by spring festival transportation in china; a population-based study[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2020,17(5):1679. DOI:10.3390/ijerph17051679.
- [14] JIA J S, LU X, YUAN Y, et al. Population flow drives spatio-temporal distribution of COVID-19 in China [J]. *Nature*, 2020,582(7812):389–394. DOI: 10.1038/s41586-020-2284-y.
- [15] YE Y, XU X, WANG S, et al. Evaluating the control strategies and measures for covid-19 epidemic in mainland China: a city-level observational study[J]. *Bull World Health Organ*, 2020. DOI: 10.2471/BLT.20.264739.
- [16] WILDER-SMITH A, FREEDMAN D O. Isolation, quarantine, social distancing and community containment: pivotal role for old-style public health measures in the novel coronavirus (2019-nCoV) outbreak[J]. *J Travel Med*, 2020,27(2). DOI: 10.1093/jtm/taaa020.
- [17] CHINAZZI M, DAVIS J T, AJELLI M, et al. The effect of travel restrictions on the spread of the 2019 novel coronavirus (COVID-19) outbreak[J]. *Science*, 2020, 368(6489):395–400. DOI:10.1126/science.aba9757.
- [18] TIAN H, LIU Y, LI Y, et al. An investigation of transmission control measures during the first 50 days of the COVID-19 epidemic in China[J]. *Science*, 2020,368(6491):638–642. DOI:10.1126/science.abb6105.

[本文编辑 沈 敏 余 方]