

12-16-2020

Prediction of Epidemic Transmission and Evaluation of Prevention and Control Measures Based on Artificial Society

Bin Chen

1. College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; ;

Yang Mei

1. College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; ;

Chuan Ai

1. College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; ;

Ma Liang

1. College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; ;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Prediction of Epidemic Transmission and Evaluation of Prevention and Control Measures Based on Artificial Society

Abstract

Abstract: The COVID-19 has been controlled under the strict measures, but how to normalize it deserves in-depth study. *The COVID-19 transmission model and the human contact network are established separately based on SEIR model and the artificial social scenario.* With the support of the multi-agent computational experiment method, a large sample calculation experiment was performed on the Tianhe supercomputer to *simulate the epidemic transmission in typical areas such as communities, schools, and workplaces in artificial cities, and to predict and evaluate the risk of epidemic spread after resumption of work and school.* The results show that epidemic prevention and control must be prepared for a protracted battle, the emergency measures should be activated before the outbreak.

Keywords

COVID-19, transmission prediction, evaluation of prevention and control measures, artificial society, computational experiment

Authors

Bin Chen, Yang Mei, Chuan Ai, Ma Liang, Zhengqiu Zhu, Hailiang Chen, Mengna Zhu, and Xu Wei

Recommended Citation

Chen Bin, Yang Mei, Ai Chuan, Ma Liang, Zhu Zhengqiu, Chen Hailiang, Zhu Mengna, Xu Wei. Prediction of Epidemic Transmission and Evaluation of Prevention and Control Measures Based on Artificial Society[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(12): 2507-2514.

基于人工社会的疫情传播风险预测和防控措施评估

陈彬¹, 杨妹¹, 艾川¹, 马亮¹, 朱正秋¹, 陈海亮¹, 朱蒙娜¹, 许伟²

(1. 国防科技大学系统工程学院, 湖南 长沙 410073; 2. 中国人民大学信息学院, 北京 100872)

摘要: 新型冠状病毒疫情在全国一盘棋的严格防控措施下已经得到了控制, 但是如何对其进行常态化的治理值得深入研究。分别基于 SEIR 模型和人工社会情景建立了新型冠状病毒疫情传播模型和人员接触网络模型; 在天河超级计算机上运用多 Agent 计算实验方法进行大样本计算实验, 模拟人工城市中社区、学校和工作场所等典型区域疫情传播, 预测和评估复工复学后疫情传播风险。实验结果表明疫情防控要做好打持久战的准备, 将应急措施作用到疫情发生相变之前。

关键词: 新型冠状病毒肺炎; 传播预测; 防控措施评估; 人工社会; 计算实验

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2020) 12-2507-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-FZ0460

Prediction of Epidemic Transmission and Evaluation of Prevention and Control Measures Based on Artificial Society

Chen Bin¹, Yang Mei¹, Ai Chuan¹, Ma Liang¹, Zhu Zhengqiu¹, Chen Hailiang¹, Zhu Mengna¹, Xu Wei²

(1. College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. School of Information, Renmin University of China, Beijing 100872, China)

Abstract: The COVID-19 has been controlled under the strict measures, but how to normalize it deserves in-depth study. The COVID-19 transmission model and the human contact network are established separately based on SEIR model and the artificial social scenario. With the support of the multi-agent computational experiment method, a large sample calculation experiment was performed on the Tianhe supercomputer to simulate the epidemic transmission in typical areas such as communities, schools, and workplaces in artificial cities, and to predict and evaluate the risk of epidemic spread after resumption of work and school. The results show that epidemic prevention and control must be prepared for a protracted battle, the emergency measures should be activated before the outbreak.

Keywords: COVID-19; transmission prediction; evaluation of prevention and control measures; artificial society; computational experiment

引言

2020 年伊始, 由新型冠状病毒肺炎 (COVID-19) 引起的疫情在祖国大地上肆虐。相较

于非典和 H1N1, 此次疫情对社会带来了极大的影响, 对我国的应急管理体系和防控工作更是带来了极大的考验。

根据国家有关法律法规和疫情防控形势, 截至 2020-01-25 T 21:00, 广东、湖南、浙江等 30 个省市自治区先后启动了突发公共卫生事件一级响应^[1]。虽然形势严峻, 但是在政府有力的防控措施下, 疫情已经基本得到了控制, 每日新增确诊



收稿日期: 2020-03-30 修回日期: 2020-06-15;
基金项目: 国家自然科学基金(71673292, 71673294),
国家社会科学基金(17CGL047);
作者简介: 陈彬(1981-), 男, 安徽芜湖, 博士, 副
研究员, 研究方向为基于 ACP 的仿真运行支撑、平
行实验方法等。

<http://www.china-simulation.com>

• 2507 •

病例呈下降趋势。但这是以停止经济活动为代价的,有数据表明,仅仅在餐饮、旅游和电影 3 个行业,疫情导致的国民经济损失已经超过人民币 1 万亿元^[2]。因此一级应急响应不能作为常态,需要根据疫情形势调整相应的防控响应等级。截至 2020-02-26,广东、贵州等地作出调整,将应急响应降为二级^[3]或三级^[4],全国大部分地区也都即将开展春节假期后的全面复工复产。受每个城市的疫情、民情、经济发展水平不同的影响,如何在当前形势下决策和评估复工复产的风险,是一项巨大的挑战。

本研究结合新型冠状病毒的通报病例数据模拟千万个体的人工社会下疫情发展演化过程,对复工复产后疫情传播趋势和风险进行预测和评估,以期为在线应急决策和预案评估提供辅助支持。

1 模型

1.1 数据来源

传染模型使用的数据来源于国家卫健委网站的疫情通报数据。统计数字表明,截至 2 月 17 日,共有确诊病例 75 571,疑似病例 5 206,死亡人数 2 239^[5]。

人工社会使用的人口数据来源于 2019 年湖北统计年鉴^[6],地理统计学数据来源于百度地图^[7]。

1.2 新型冠状病毒传染动力学模型

采用传染病动力学 SEIR 模型^[8]作为新型冠状病毒传染病动力学模型。针对此次新冠病毒疫情,已经有大量的研究工作估计 SEIR 模型的参数并预测走势^[9-10]。

假设一个感染态个体(I 态)与易感染态个体(S 态)接触,易感染态个体被感染进入潜伏期的概率(传染率)为 β ; 一个处于潜伏期的 E 态个体单位时间内将以概率 γ_1 转变为 I 态; 一个 I 态个体单位时间内将以概率 γ_2 转变为 R 态(单位时间为天)。

图 1 显示了个体的健康状态之间的变迁,其中 S 代表易感人群; E 代表被感染后处于潜伏期的人群; I 代表潜伏期之后已具有感染能力的人群; R 表示已经因为治愈并获得免疫、被有效隔离或因病死亡等原因已经不对流行病传播动力学产生影响的人群。

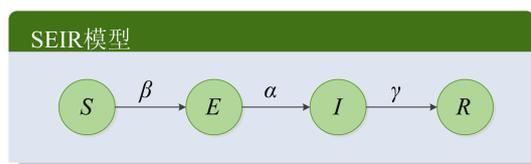


图 1 个体健康状态之间的变迁

Fig. 1 Changes between individual health states

SEIR 传播过程可用 4 个微分方程进行描述:

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

$$\frac{dE(t)}{dt} = \frac{\beta S(t)I(t)}{N} - \gamma_1 E(t) \quad (2)$$

$$\frac{dI(t)}{dt} = \gamma_1 E(t) - \gamma_2 I(t) \quad (3)$$

$$\frac{dR(t)}{dt} = \gamma_2 I(t) \quad (4)$$

式中: $S(t)$, $E(t)$, $I(t)$ 和 $R(t)$ 分别为 t 时刻网络中处于易感态、潜伏态、感染态和移除态的个体数目; N 表示系统中个体总数目,且 $N=S(t)+E(t)+I(t)+R(t)$ 。

SEIR 微分方程模型描述的是人群整体的疾病传播特征,而没有体现出个体在疾病传播过程中的差异性。在 SEIR 模型中,有两个重要假设:一是环境中的个体彼此之间接触的机会概率是相同的;二是关于接触的持续时间、接触频率这些特征都集成在了参数 β 中。因此,基于 SEIR 模型,新型肺炎传染病动力学模型如图 2 所示。病程在 4 种状态中切换,个体的传染性和免疫力根据不同的状态变化。其中传染性的变化示例如图 3 所示,在症状凸显之前逐渐变强,在症状凸显之后到康复期逐渐变弱。

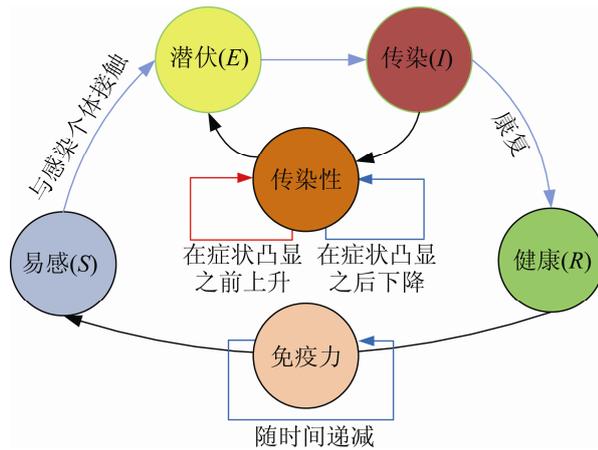


图 2 新型冠状病毒肺炎的传染病动力学模型

Fig. 2 Infectious disease dynamics model of COVID-19

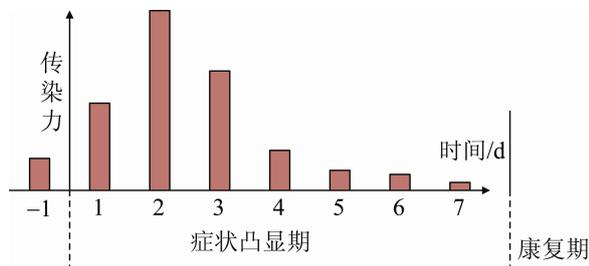


图 3 新型冠状病毒肺炎的个体传播率变化

Fig. 3 Changes in the transmission rate of COVID-19

1.3 模型参数估计

基于前述病例数据, 通过预备实验估计本次疫情中动力学 SEIR 模型的模型参数。新型肺炎传播基本再生数 R_0 为 2.2(95%置信区间: [1.4, 3.9]), 倍增时间为 7.4 天(95%置信区间: [5.3, 19])。使用 SEIR 模型描述发病过程: $S \xrightarrow{\alpha S} E \xrightarrow{\beta E} I \xrightarrow{\gamma I} R$, 由于 $1/\beta=5.2$, 故 β 取为 0.19。注意到 $R_0=\gamma/\beta=2.2$, 所以 $\beta=0.42$ 。在仿真实验中, 取感染概率为 1.61‰时, 初始 41 人感染了 COVID-19, 不加干预情况下倍增天数为 7.3。实验结果如图 4 所示。

2 新型冠状病毒疫情传播计算实验平台

新型冠状病毒疫情传播计算实验采用的平台为非常规突发事件应急管理计算实验平台 KD-ACP^[11]。平台由人工社会情景构造、人工社会计算

实验方案设计、人工社会计算实验支撑环境、人工社会状态可视化和应急决策平台等工具构成, 平台的工作流如图 5 所示。根据新型肺炎的疫情传播特征, 基于前述提到的模型, 设置新型冠状病毒疫情传播的计算实验情景。利用人工社会情景构造工具基于武汉的人口地理统计学数据生成人工武汉, 为计算实验提供人口数据支持; 其次利用实时注入的各类疫情动态数据对疫情计算实验需要的各类模型进行参数设置; 再次利用人工社会计算实验方案设计工具, 根据公共卫生应急响应的要求进行各级应急干预措施的设置, 产生大量的实验样本^[12]。

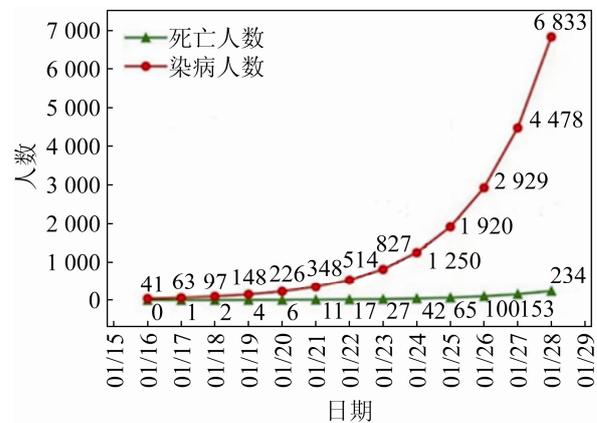


图 4 预备实验中死亡人数及染病人数随着时间的变化曲线

Fig. 4 Changes in the number of deaths and infected patients over time in preliminary experiments

基于这些样本, 利用大规模人工社会运行支撑工具开展计算实验, 并利用人工社会状态可视化工具对实验结果进行事后的展示。最后应急决策平台基于可视化工具提供的信息进行人在回路的混合智能决策, 利用决策的结果对人工社会情景进一步调整, 进行下一步迭代。通过反复计算实验, 最终为应急决策提供量化的支持。

3 预测实验结果

利用基于多 Agent 的计算实验方法, 能够从宏观相结合的方式, 从每个个体的角度对于复工复产过程中的风险和应对措施进行定量分析。

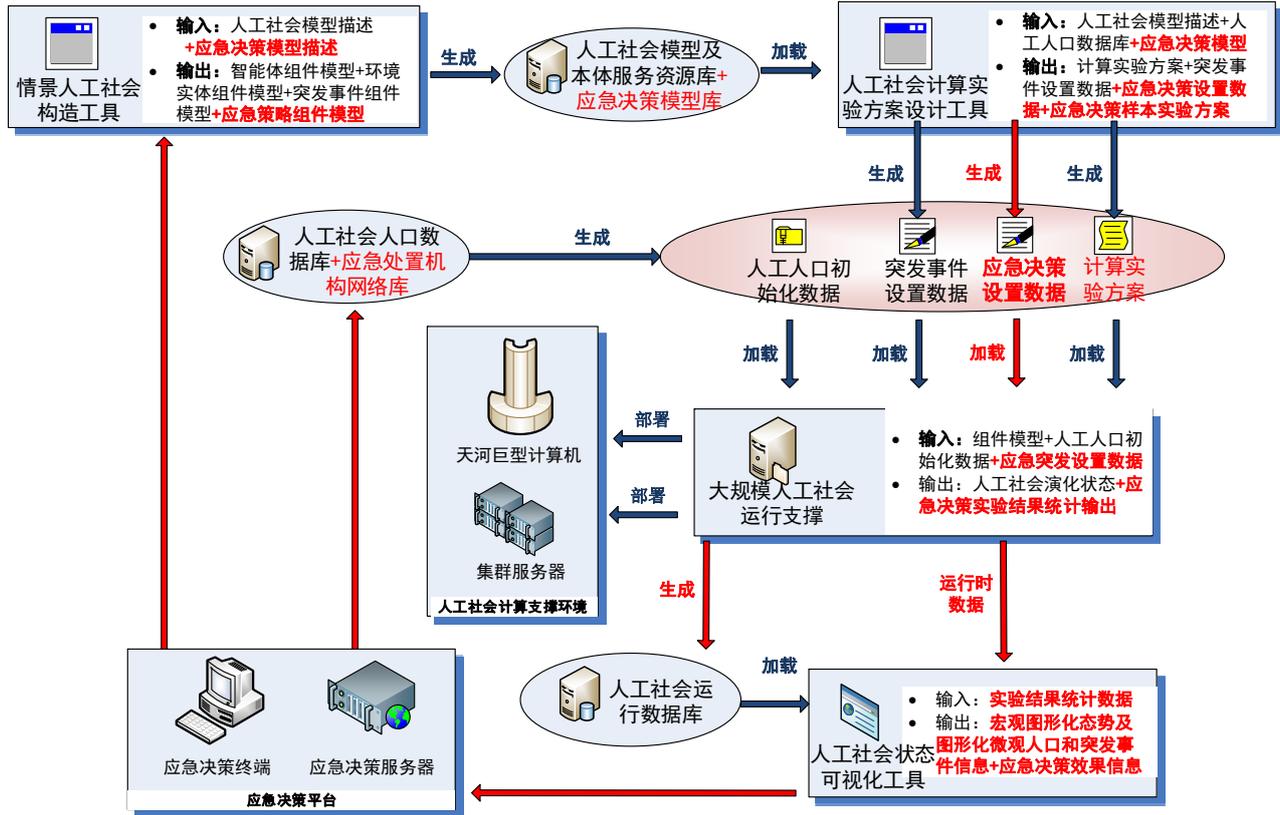


图 5 非常规突发事件应急管理计算实验平台 KD-ACP 架构

Fig. 5 KD-ACP architecture of unconventional emergency management calculation experiment platform

政府在复工复学后的疾控预案是否合理非常关键，是抗“疫”的攻坚战。计算实验选择了人工城市中复工复学涉及的社区、学校、工作场所 3 类区域和 15 种措施展开了计算实验。其中社区的规模为 1.5 万人，家庭关系平均度为 4，以二代家庭为主；学校的规模为 0.6 万人，编为 120 个班级和 1 500 个宿舍；工厂的规模为 2 万人，编为 1 千个班组。所有 Agent 由人口地理模型生成，具备基础家庭关系，学校和工厂的社会关系按照小世界网络模型设定，并叠加了 BA 网络。

1) 社区

关注重点地区重点人员。近 14 天有外省及疫情重点地区(范围同上)行程史的人员，须在第一时间主动向居住地社区报告；不主动申报及拒绝接受测温、医学观察等防控措施，将依法追究法律责任。居住在本社区的疫情重点地区人员，有疫情重点地区行程史人员，必须实行严格的居家隔

离硬管控，明确管控责任人。社区一旦发生确诊病例情况，应积极配合政府相关部门，及时采取局部封闭措施，确保疫情不蔓延、不扩散。

结合上述社区的防控措施进行计算实验，综合考虑无措施、控制输入性传染源、加强检疫、严格管控 4 种情况。计算实验结果如图 6 所示。

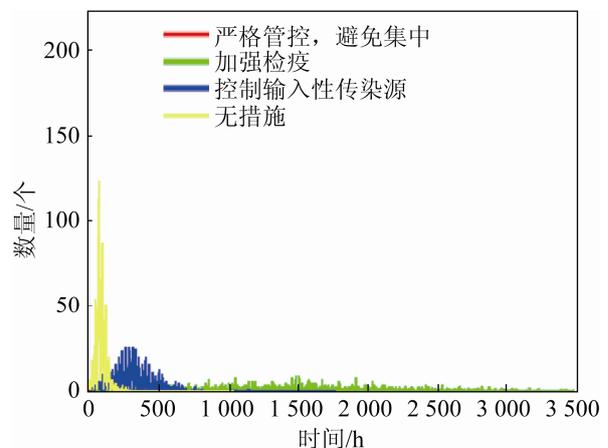


图 6 社区内部在 4 种情况下的每日新增病例曲线

Fig. 6 Daily new case curves in the community

图 6 给出了社区内部在无措施、控制输入性传染源、加强检疫、严格管控 4 种情况下的每日新增病例曲线。

从图 6 中可以看出在社区内, 各项措施的效果都比较好。结果体现出以下特点:

第一, 无措施情况下, 传染人数相对于工作场所和学校要少一些(社区 15 000 人, 感染 3 000 余人)。这主要是因为该环境没有考虑去工作和上学受到感染的情况因此无管控的情况下感染人数也不会太多。

第二, 严格的管控措施效果很好, 最严格的措施使得疫情很快得到控制。

第三, 普通的管控措施也是有效果的, 无论是感染人数增加的速度, 还是总量, 都能一定程度上控制感染人数, 这些措施都有积极意义, 但不能完全杜绝传播。

因此整体上看, 对于社区来说, 如果有潜在病例, 严格的措施能很好的维护社区的安全, 但这条件是社区内人员没有上学、上班等大规模的与外界接触, 而这与复工复学是矛盾的。

2) 学校

对于学校的校园, 结合全国各地发布的疾控政策总结了 5 条防控措施如下:

(1) 创建良好的学校卫生环境。做好校园环境的清扫保洁, 消除卫生死角。特别要做好教室、宿舍、图书馆、食堂等人群聚集场所的保洁和通风, 保持教室空气流通, 安排专人负责定期进行消毒。

(2) 启动入校体温检测制度, 严控进校人员管理, 在图书馆、食堂、会议室、宿舍楼等人群密集场所均要配置体温枪, 必须测量体温后入内。学校需要控制人员出入, 仅开放 1~2 个门最好, 所有人员进出一律测体温, 外来人员和车辆一律严控。实施凭证出入。①教职工佩戴校徽凭通行证进出校园; ②校内住户凭身份证加出入证, 两证齐全进出校园, 每户家庭每两天只能指派 1 名家庭成员凭证进出一次, 出入证实行“一户一证”

制度, 进出情况由工作人员标识注明, 严格做到“见证放行”; ③校内务工人员凭身份证加出入证两证齐全进出校园; ④来校联系工作或办事人员凭身份证、介绍信或联系学校部门的同志电话进出, 并按要求做好相关信息登记。所有进出校园人员必须佩戴口罩, 加强防控。

(3) 落实学校健康体检、晨检及因病缺课登记和追踪的制度。对于中小学教职员工和学生每日进行晨检、因病缺勤登记与报告、复课证明等日常工作。不允许带病上学或上班。因病缺课(勤)人员应由校医根据医院返校证明和隔离期限确认后, 方可返校。校医和保健老师应做好个人防护, 预防飞沫传播和接触传播, 相关废物进行有效消毒处理。

(4) 学校食堂采购人员、送货人员和查验人员在工作期间做好个人防护。加强对集体配餐单位监控管理, 督促落实送餐到校人员的健康管理和个人卫生防护。坚持分餐制度, 减少师生在就餐高峰期的接触。

(5) 中小学若发现个别确诊或疑似病例, 在对密切接触者进行隔离观察的同时, 可对确诊或疑似病例所在班级暂停集中上课。若学校发现多个班级有学生感染, 会商卫生健康部门研判后, 可报请辖区政府批准后, 予以全校停课, 并及时报告上级教育行政部门。对于出现确诊或疑似病例的高校, 学校可根据其活动范围, 在相应范围内调整教学方式和学习方式, 暂时避免集中上课。

结合上述 5 条防控措施, 计算实验的结果如图 7 所示, 有以下几个特点:

第一, 在无措施的情况下, 学校里感染人数在很短的时间内就会急速上升, 很快全校都会被感染。

第二, 当采取了一般性的措施时, 如环境消毒, 加强检疫, 感染人数增长得到了控制, 总体感染人数也大大减少。

第三, 环境消毒和检疫这类措施不能有效控

制疫情扩散，在初步遏制之后，仍然不断出现传播事件直至染病人员及密切接触者均被隔离。

第四，只有采取了最严格的措施，即避免集中上课或停课，结合加强检疫、环境消杀等措施后，新增感染才会大大减缓，但是仍然有一定感染增加。这主要是因为该病潜伏期传染性也很强，只要有一例感染未被发现，在学校这种高度集中的地方，宿舍、教室等地的接触感染就很难避免，形成新的传播链条。

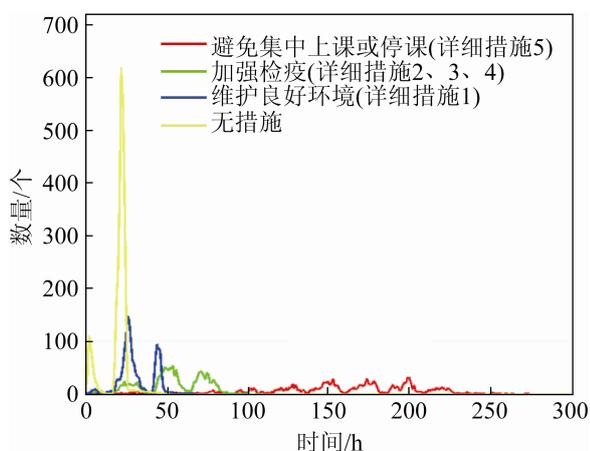


图 7 学校校园内部在 4 种情况下的每日新增病例曲线
Fig. 7 Daily new case curves in the school campus

3) 工作场所

对于工作场所，结合全国各地发布的针对工业园区等人员较集中的地区的疾控政策总结了 6 条防控措施如下：

(1) 完善职工岗前检查、因病缺勤登记追踪、通风消毒等制度。要建立员工的发热等异常情况记录制度，指定专人负责与离岗人员联系，了解每日健康状况并登记。

(2) 加强疑似症状监测，对有疑似症状人员应主动报告。出现发热、乏力、干咳及胸闷等疑似对象时，应立即做好各项防护措施，就近送至发热门诊，并向上级主管部门报告，并协助专业机构开展相关调查处置工作。

(3) 适合远程办公的工作，如程序员、编辑、设计等等工种，暂时不安排集中场所工作，在家远

程办公。减少现场办公人员，避免人员聚集。

(4) 工厂在防疫期应暂时取消或控制人数参加集体活动及大型会议，尽量减少或停止因公出行、聚会等。如需要，须向各级管理层报告并取得同意。

(5) 启动进出公司、工厂的体温检测制度，严控进出公司和工厂的人员管理。公司和工厂需要控制人员出入，仅开放 1~2 个门最好，所有人员进出一律测体温，外来人员和车辆一律严控。实施凭证出入。

(6) 加强健康宣教。要求职工佩戴口罩，开展“手卫生”教育，各类场所配备洗手龙头、洗手液、抹手纸或干手机。倡导职工养成常洗手的好习惯。减少不必要的会议、聚餐等。食堂采用分餐进食，避免人员集中。

结合上述 6 条防控措施进行计算实验，实验结果如图 8 所示。

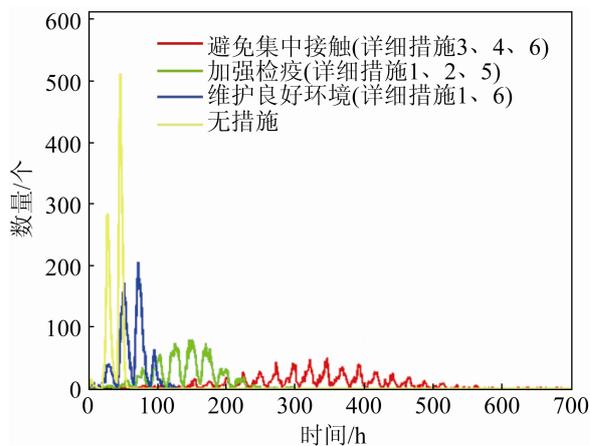


图 8 工作场所在 4 种情况下的每日新增病例曲线
Fig. 8 Daily new case curves in the workplace

该实验结果体现了工作场所的疫情传播具有以下特点。

第一，传染人数多，从图 8 中可以看出，无措施的情况下一天增加几千人，十分迅速，这主要是由于该实验环境是一个较大的工作场所，有 2 万人，工人白天上班，晚上在宿舍休息，接触比较密集导致的。

第二, 传染人数没有因为严格的措施使得密集的接触减少而减少, 这主要是因为该病传染性太强, 存在无症状感染者, 在工作场所, 工作和休息无可避免要相互接触, 无症状感染者很容易成为“超级传染者”, 该传染的还是要传染。

第三, 只要在工作过程中依然存在接触网络, 疫情就不会被快速控制, 如图 3 所示, 会呈现出不断反复的情况。这是由于新冠病毒肺炎的潜伏期传染性和长潜伏期造成的。

第四, 与校园的实验结果相比, 在人群规模更大, 单位区域内活动人数越多的空间内, 疫情持续的时间显著增加, 反复的次数更多。因此, 可以推导出, 在城市尺度上可以演化为更加频繁的小规模疫情活动。

4 讨论

结合计算实验的结果, 针对疫情没有完全结束时如何逐步复工复产, 有以下几点建议:

(1) 做好长期抗“疫”准备

计算实验的结果说明, 基于新型冠状病毒的传播特性, “人-人”传播是最主要的传播途径, “早隔离”仍旧是“抗疫”唯一有效的处置方法。基于当前实施的有力防控措施, 复工复产后大的疫情不会再度出现, 但是小的疫情事件会不断出现, 形成在大局稳定下的一系列“局部冒泡”事件。因此, 疫情处置在相当长的一段时间内仍是工作的中心, 要做好持久战的准备。

(2) 基于信息公开共享建立高危人员的发现机制

为及时、有效地发现甄别“潜伏期”高危人群, 实现“早发现”, 建议建立个人端的信息公开共享和政府端的高危人群预警机制。对于个人端, 利用“健康码”技术进行信息采集, 进行复工复产人员登记、个人健康自查上报、疫情线索举报、同行密接自查、发热门诊查询等操作, 实现对于复工复产出行人员的痕迹采集与上报; 对于政府端, 基

于上报的数据专门设置数据分析预警人员, 利用“自然语言处理”、“个体影响力分析”、“群智感知算法”等智能技术, 对从事密集性服务行业和跨区流动性较强的复工复产人群进行重点关注, 对潜在高危人群进行有效甄别, 针对其健康状态的变化及时预警并上报接触人员情况。

(3) 对复工复产落实精准防控措施

为解决现有的公共卫生应急条例和预案执行力弱的问题, 建议在目的地城市以高危人群和复工复产场所为主要疾控对象, 设置精准疾控预案体系。对于高危人群, 按人群类型和个人健康状况(健康、疑似、确诊)设置疾控预案, 通过控制外出工作时间降低接触强度; 对复工复产场所则按类型(商住两用型社区、住宅型社区、厂宿舍一型社区、小学校园、中学校园、大专院校校园等)进行暴露性分析, 建立从环境清理、监测报告、定点隔离、物资调配等多种措施融合的完备疾控预案。从个体和单位区域两个角度对应重点人群和重点区域, 实现精准高效的“早发现、早隔离”。

(4) 加强复工复产过程中的宣传和引导

由于抗“疫”是一场全民参与的持久战, 为避免降低应急响应和复工复产过程中群众防控意识松懈的问题, 需要加强宣传和引导, 以确保复工复产过程中稳步开展。

此外, 建议基于多 Agent 的计算实验方法对疾控预案进行优化。基于对城市人口建立的计算机镜像 Agent, 构建城市体量的人工城市(课题组在天河超级计算机上构建了千万级以上人口的人工城市)实验床, 实验可视化效果如图 9 所示。通过设计海量样本的计算实验, 对疾控预案的设置进行事前评估。特别是从成本和效果两个角度对具体到人的防控措施进行精细化评测, 通过反复的实验迭代, 获得精准预案。从而支持城市级别情景-应对型案例化的应急响应处置, 为政府进行合理有效的抗“疫”预案建议, 实现社会生产生活的快速恢复。

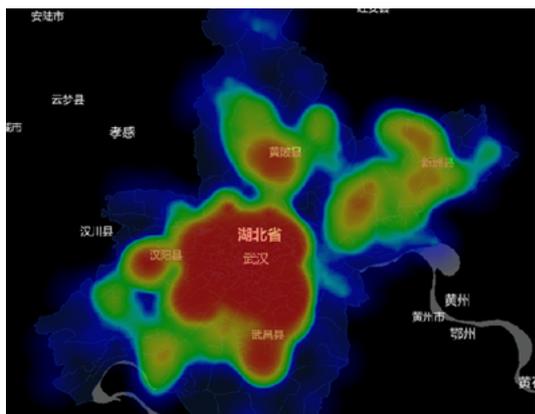


图 9 人工城市疫情扩散计算实验可视化效果图

Fig. 9 Visualization effect diagram of artificial city epidemic spread calculation experiment

5 结论

本文基于 KD-ACP 平台构建了新型冠状病毒肺炎计算实验平台, 利用平台展开了对人工城市中社区、学校和工厂的疫情传播计算实验。通过对实验结果的分析表明: 对待疫情要做好打持久战的准备, 抓好“人-人”传播途径的关键点, 建立高度敏感的潜在接触人群预警机制, 提升疾控的韧性水平, 将应急措施作用到疫情发生相变之前。

参考文献:

- [1] 新浪新闻. 30 省市自治区启动一级响应[EB/OL]. [2020-02-26]. <https://news.sina.cn/2020-01-25/detail-iihzhha4654616.d.html?vt=4&pos=3>.
Sina News. 30 Provinces Start I Level Reponse [2020-02-26]. <https://news.sina.cn/2020-01-25/detail-iihzhha4654616.d.html?vt=4&pos=3>.
- [2] 新浪财经. 张军说疫情对 GDP 的冲击没有你想的那么大[EB/OL]. [2020-02-26]. <http://finance.sina.com.cn/roll/2020-02-18/doc-iimxyqvz3743797.shtml>.
Sina Finance. Jun Zhang Said the Epidemic Impact on GDP is not as strong as expecting[EB/OL]. [2020-02-26]. <http://finance.sina.com.cn/roll/2020-02-18/doc-iimxyqvz3743797.shtml>.
- [3] 广东省卫生健康委员会. 广东省决定省重大突发公共卫生事件一级响应调整为二级响应[EB/OL]. [2020-02-26]. http://wsjkw.gd.gov.cn/zwyw_gzdt/content/post_2905980.html.
The Medical and Health Committee of Guangdong. Guangdong Adjusts the Response from Level I to Level II. [EB/OL]. [2020-02-26]. [gzdt/content/post_2905980.html.](http://wsjkw.gd.gov.cn/zwyw_

</div>
<div data-bbox=)

- [4] 贵州省卫生健康委员会. 我省新冠肺炎疫情防控应急响应级别由一级调整为三级 省疫情防控领导小组办公室负责同志答记者问[EB/OL]. [2020-02-26]. http://www.gzhfpc.gov.cn/xwzx_500663/gzbs/202002/t20200226_51680977.html.
The Medical and Health Committee of Guizhou. Guizhou Adjusts the Response from Level I to Level III. [EB/OL]. [2020-02-26]. http://www.gzhfpc.gov.cn/xwzx_500663/gzbs/202002/t20200226_51680977.html.
- [5] 中国-世界卫生组织新型冠状病毒肺炎(COVID-19)联合调查组. 中国-世界卫生组织新型冠状病毒肺炎(COVID-19)联合考察报告[R]. 2020.
The China-WHO Joint Investigation Team on Novel Coronavirus Pneumonia (COVID-19). China-WHO joint investigation report on novel coronavirus pneumonia (COVID-19)[R]. 2020.
- [6] 湖北省统计局. 湖北省 2019 年统计年鉴[EB/OL]. [2020-02-04]. <http://tjj.hubei.gov.cn/tjsj/sjkscx/tjnj/qstjnj>.
The Bureau of Statistics of Hubei. The Yearbook of Hubei in 2019. [EB / OL]. [2020-02-04]. <http://tjj.hubei.gov.cn/tjsj/sjkscx/tjnj/qstjnj>.
- [7] 百度地图. [EB/OL]. [2020-02-04]. <https://map.baidu.com/>.
Baidu Map. [EB/OL]. [2020-02-04]. <https://map.baidu.com/>.
- [8] Herbert W. Hethcote. The Mathematics of Infectious Diseases[J]. SIAM Review (S0036-1445), 2000, 42(4): 599-653.
- [9] Yang Z F, Zeng Z Q, Wang K, et al. Modified SEIR and AI Prediction of the Eepidemics Ttrend of COVID-19 in China under Public Health Interventions[J]. Journal of Thoracic Disease (S2072-1439), 2020, 12(3): 165-174.
- [10] Wang X, Tang S Y, Chen Y, et al. When will be the Resumption of Work in Wuhan and Its Surrounding Areas During COVID-19 Epidemic? A Data-Driven Network Mdeling Analysis[J]. Scientia Sinica Mathematica (S1674-7216), 2020, 50: 1-10.
- [11] Chen Bin, Zhang Laobing, Guo Gang, et al. KD-ACP: A Software Framework for Social Computing in Emergency Management[J]. Mathematical Problems in Engineering (S1024-123X), 2015(2015): 1-27.
- [12] 邱晓刚, 陈彬, 张鹏. 面向应急管理的人工社会构建与计算实验[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
Qiu Xiaogang, Chen Bin, Zhang Peng. Emergency Management Oriented Artificial Society Construction and Computational Experiments[M]. Beijing: Science Press, 2017.

<http://www.china-simulation.com>

• 2514 •