

基于 ACP 方法的新型冠状病毒肺炎疫情管控措施效果评估

马亮^{1,2}, 杨妹¹, 艾川¹, 朱正秋¹, 陈海亮¹, 朱蒙娜¹, 段伟¹, 邱晓刚¹, 吕欣¹, 陈彬¹

(1. 国防科技大学系统工程学院, 湖南 长沙 410073; 2. 国防科技大学北京学科交叉中心, 北京 100101)

摘要: 利用信息技术手段对疫情管控措施进行评估, 从而指导管控措施的实施, 对疫情防控具有理论和现实意义。基于 ACP 方法和统计数据构建了人工城市计算实验平台, 建立了针对具体疫情管控的社区、学校、工厂 3 类典型场所的人工社会模型, 通过计算实验对新型冠状病毒肺炎疫情的管控措施进行评估。结果发现, 检验检疫、自我防护管控措施只能够延缓疫情中感染人数峰值的到来, 对降低总感染人数的效果不明显, 只有经济代价巨大的隔离措施能够显著地抑制疫情的发展。隔离措施的良好效果表明, 有效阻断“人-人”传播链是疫情控制的关键环节, 因此建议综合采用检验检疫、大数据、人工智能等手段精准筛查病患及潜在感染者。

关键词: ACP 方法; 新型冠状病毒肺炎; 管控措施; 效果评估

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.202010

The evaluation of the control measures for COVID-19 based on ACP approach

MA Liang^{1,2}, YANG Mei¹, AI Chuan¹, ZHU Zhengqiu¹, CHEN Hailiang¹,
ZHU Mengna¹, DUAN Wei¹, QIU Xiaogang¹, LU Xin¹, CHEN Bin¹

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

2. Beijing Institute for Advanced Studies, National University of Defense Technology, Beijing 100101, China

Abstract: It is theoretical and practical significance for epidemic prevention and control to evaluate epidemic control measures using information technology so as to guide the implementation of epidemic control measures. Based on ACP approach and statistical data, a platform of computation experiment for artificial city was constructed, from which artificial models were established for three typical places, namely community, school and factory, to support the evaluation of specific epidemic control measures. The control measures of COVID-19 were evaluated through the computational experiments. The results showed that the control measures of quarantine and self-protection could only delay the peak of the number of infected people in the epidemic, but had no obvious effect on reducing the total number of infected people. Only the isolation measure with huge economic cost could significantly inhibit the development of the epidemic. The effect of the isolation measures showed that effectively blocking the “person-to-person” transmission chain was the key to the epidemic control. Therefore, it was recommended to adopt comprehensive means involving inspection and quarantine, big data, artificial intelligence and so on to accurately screen the patients and potential infected people.

Key words: ACP approach, COVID-19, control measures, effect evaluation

收稿日期: 2020-01-16; 修回日期: 2020-02-26

通信作者: 陈彬, nudtcb937@gmail.com

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2018YFC0806900); 国家自然科学基金资助项目 (No.71673292, No.71673294); 国家社会科学基金资助项目 (No.17CGL047)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2018YFC0806900), The National Natural Science Foundation of China (No.71673292, No.71673294), The National Social Science Foundation of China (No.17CGL047)

1 引言

2019 年 12 月在武汉相继发现不明原因的感染性肺炎患者, 病原学研究证实这是由一种新的冠状病毒感染所致的。中华人民共和国国家卫生健康委员会将由该病毒所致的肺炎命名为新型冠状病毒肺炎, 简称新冠肺炎。新型冠状病毒具有“人-人”传播特征, 可通过社区聚集、家庭聚集快速播散, 并呈现全球蔓延的趋势^[1-2]。

了解新冠肺炎在人群中的传播模式及科学评估管控措施的实施效果对维持疫情下社会经济生产生活的正常秩序具有重要意义。本文通过基于人工社会(artificial societies)、计算实验(computational experiments)、平行执行(parallel execution)的方法, 即 ACP 方法^[3-4], 对新冠肺炎疫情管控措施效果进行评估, 能够为疫情下的社会经济生产生活的正常运行提供有益决策支持。ACP 方法的核心是: 针对复杂社会系统, 构造人工社会系统, 该人工社会系统能够实现与实际社会系统的虚实交互、协同演化、闭环反馈和平行控制。通过在软件定义的“社会实验室”中对已发生及可能发生的事件进行试验和计算, 为真实社会场景的管理与决策提供可靠支持^[3-4]。

传染病建模方法可以分为基于数学方程的方法及基于计算的建模方法^[5]。基于数学方程的方法使用数学方程描述传染病传播的宏观规律, 如仓室模型(SI 模型、SIR 模型、SEIR 模型)^[6]、Reed-Frost 模型^[7]。基于计算的模型包括基于复杂网络的传播模型和基于 agent 的模型。在复杂网络模型中, 节点即代表人群中的个体, 连边代表个体与个体之间的交互关系^[8]。基于复杂网络的传染病传播模型主要研究网络拓扑结构、连边权重、网络自适应性对传染病传播规律的影响^[8]。基于 agent 的模型, 如 BioWar^[9]、EpiSimdemics^[10]及 FluTE^[11], 能够以自底向上的方式建立传染病的传播过程模型, 单个 agent 是现实人群中的一个个体在模型中的建模实现, 能够考虑多种影响传染病传播规律的复杂因素。基于上述传染病模型, 研究者们对非典型肺炎(SARS)、H1N1 等流行性传染病在社区、城市、洲际间的传播规律做了研究, 提高了人们对相关传染病的传播规律的认识, 有助于人们对传染病进行及时预警及有效管控^[12]。

当前对新冠肺炎的预测及管控的研究多采用

SEIR 模型, 具体做法是使用疫情数据, 对 SEIR 模型参数进行估计, 从而预测新冠肺炎疫情未来发展情况^[13-15]。王霞等^[14]将 2020 年 1 月 23 日到 2 月 9 日的时间段按照疫情管控措施强度划分为 3 个阶段, 由于不同阶段模型参数值中蕴含了管控措施的不同强度, 因此使用参数迁移的手段对复工、复学后已有管控措施强度下的风险进行了分析。此外, 也有研究者采用统计学习模型对疫情数据进行预测, 如 Yang 等^[13]使用长短期记忆(long short-term memory, LSTM)网络对疫情序列数据进行学习, Ai-Qaness^[16]建立了 FPASSA-ANFIS 模型, 进行疫情预测。上述研究方法固有的不足是无法细致考虑精细的管控措施对疫情发展的影响, 难以支持不同粒度的管控措施效果的验证与评估。

很多学者基于 ACP 的方法对传染病疫情进行分析及管控措施评估。Ge 等^[17]、Duan 等^[18]建立了人工学校对 H1N1 疫情进行研究。Zhang 等^[19]建立了人工北京, 对埃博拉病毒的输入风险及管控措施进行评估。本文基于 ACP 方法, 针对社区、学校、工厂 3 类典型场所, 分别建立支持新冠肺炎人群传播与管控的人工社区、人工学校、人工工厂, 通过计算实验对不同强度疫情管控措施的效果进行评估。

后续文章组织结构如下: 首先介绍人工社会建模, 包含人工社会建模方法及社区、学校、工厂 3 类典型的人工社会模型; 然后进行计算实验, 并对实验结果进行了分析; 最后是全文总结与展望。

2 人工社会建模

本节首先介绍构建人工城市计算实验平台的人工社会建模方法, 包含人工城市人口地理建模、个体时空交互行为建模、新冠肺炎病患的病程建模以及管控措施建模; 然后, 针对社区、学校、工厂 3 类典型场所, 从人工城市中分别选择一个典型的社区、学校及工厂构建了相应的人工社区、人工学校及人工工厂。在人工社会中, agent 对应于现实社会中的行为个体, 通过赋予 agent 各类社会特征和行为规则, 可实现在人工社会中重演“人”在日常生活中的社会行为^[20]。

2.1 人工社会建模方法

2.1.1 人工城市人口地理建模

人口地理模型着力解决如何将宏观数据映射到微观个体属性以及如何保证人口内在逻辑正确

表 1 工人的活动日志

持续时段	活动类型	地点	概率
00:00-08:00	睡觉	家	100%
08:00-12:00	工作	工作地点	100%
12:00-13:00	午饭	食堂/餐馆	100%
13:00-17:30	工作	工作地点	100%
17:30-18:00	休息	家	50%
	购物	商场	45%
	健身	体育馆	5%
18:00-19:00	晚餐	家/餐馆	100%
19:00-20:00	休息	家	50%
	娱乐	文体中心	50%
20:00-23:00	休息	家	100%
23:00-24:00	睡觉	家	100%

随着仿真时间的推进, agent 个体在个体空间移动网络中的地理空间场所节点中转移, 多个 agent 个体聚集在同一个地理空间场所时产生接触行为。受 agent 在地理空间中从事活动性质等因素的约束, 一个 agent 个体只能从该地理空间中的所有 agent 集合中按照概率选择 N_C 个 agent 个体进行接触。设任意 agent 为 a_i , 与其同一地理空间的 agent 集合为 M_i , 则对于任意 $a_j \in M_i$, a_i 选择 a_j 进行接触的概率为:

$$p_{ij} = \frac{w_{ij}}{\sum_{a_q \in M_i} w_{iq}} \quad (1)$$

2.1.3 新冠肺炎病患的病程建模

新冠肺炎目前有直接传播、气溶胶传播、接触传播 3 种主要传播方式^[1]。所有人都是新冠肺炎的易感人群, 易感人群一旦被感染, 则会处于潜伏期, 并且具有传染性, 绝大部分人的潜伏期为 1~7 天, 平均 3 天^[21], 潜伏期过后, 个体会处在凸显期并持续 14~21 天^[1], 经过凸显期, 个体死亡的概率 γ 取为 2.01%^[22]。图 2 展示了新冠肺炎病人的病程发展过程。在一次有效接触中, 易感 agent 个体按照概率 p 被具有传染性的个体感染, 此状态转移过程由虚线箭头指示。根据 Yang^[1]的估计方法, 设定 p 为 0.052 49。

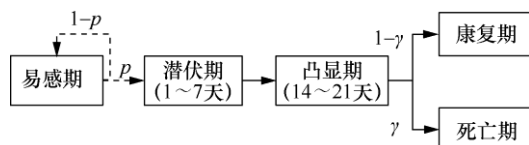


图 2 新冠肺炎病患的病程发展模型

2.1.4 管控措施建模

随着疫情的发展, 人们对新型冠状病毒及其病患的危害有了逐步深入的理解, 从全球不同国家防疫情

况来看, 不同的文化、不同的政治制度催生了不同的战“疫”实践。最基本的管控措施包括自我防护(环境消毒、戴口罩)、检疫、隔离以及综合措施。

(1) 自我防护: 个体或者群体自适应地根据对疫情及其防控知识的了解, 采取的降低自身被患者感染概率的措施。如 agent 个体佩戴口罩, 对环境卫生进行消毒清洁。

(2) 检疫: 以体温、医疗检测试剂盒、CT 等医疗手段对 agent 个体感染情况进行判断, 每日检测 3 次, 一旦 agent 个体被确诊为新冠肺炎, 则进行定点隔离观察。

(3) 隔离: 终止一切不必要的社会生活、生产活动, 居民在家隔离, 学生、工人在宿舍隔离。

(4) 综合措施: 采取包含(1)~(3)的管控措施。

(5) 无隔离的综合措施: 由于隔离措施经济代价非常大, 因此还要考虑不包含隔离措施的综合措施, 即采取包含(1)、(2)的管控措施。

表 2 分别列出了无管控措施、自我防护、检疫、隔离措施、无隔离的综合措施、综合措施在人工社会模型中的相应参数的取值。表 2 中, 采用自我防护措施和不采用任何管控措施的新冠肺炎感染概率之比为 $\alpha=0.5$ 。

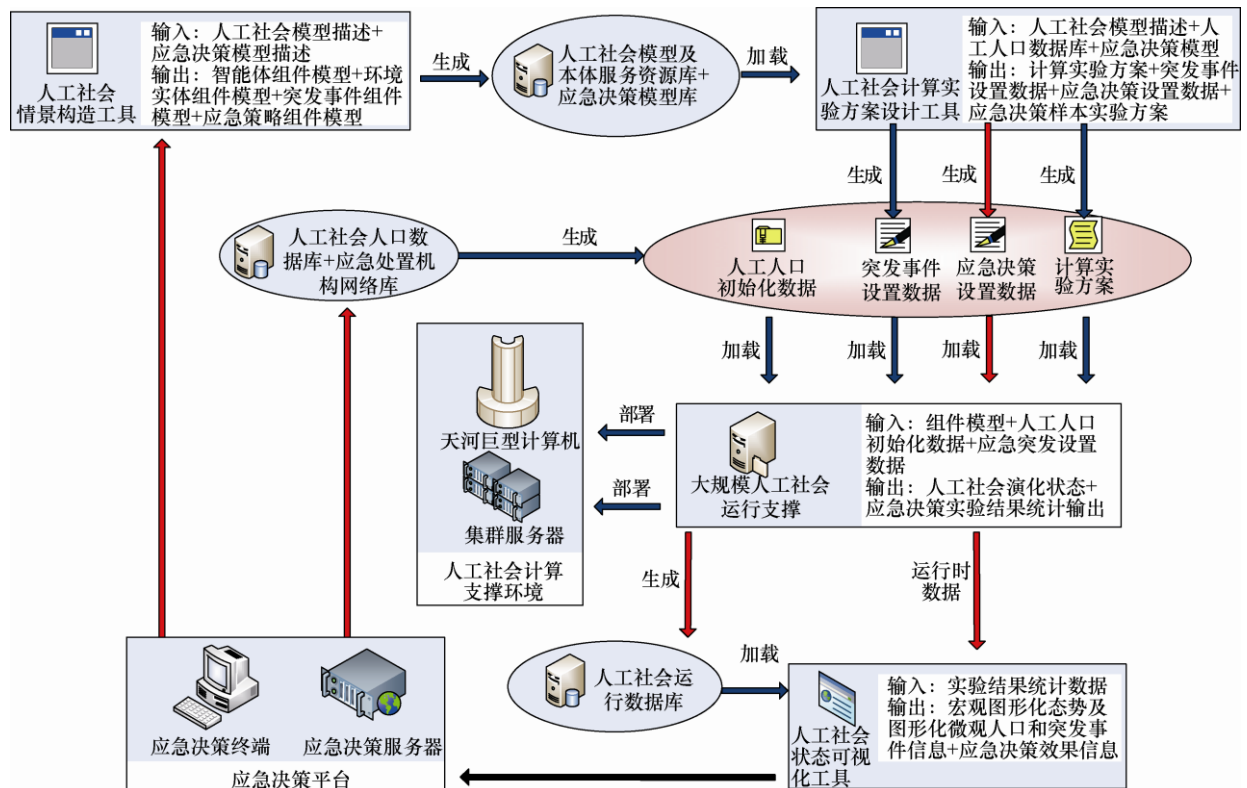
2.1.5 人工城市计算实验平台

基于上述方法, 构建了人工城市计算实验平台^[23]。平台由人工社会情景构造工具、人工社会计算实验方案设计工具、人工社会计算实验支撑环境、人工社会状态可视化工具、大规模人工社会运行支撑工具和应急决策平台等构成, 人工城市计算实验平台工作流程如图 3 所示。首先, 基于前面的模型, 设置疫情的计算实验情景; 其次, 利用人工社会情景构造工具构造人工城市, 为计算实验提供人口数据支持; 再次, 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; 然后, 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要求进行各级防控措施的设置, 产生大量的实验样本。接着, 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。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, 最终为管控措施方案的生成提供精准的量化支持。

表 2

管控措施模型参数

人工社会类型	管控措施	环境实体内接触频次	感染概率	检疫次数	检出概率
社区	无	正常	p	0	—
	自我防护	正常	αp	0	—
	检疫	正常	p	3	0.9
	隔离	受限	p	0	—
	综合（无隔离）	正常	αp	3	0.9
	综合	受限	αp	3	0.9
学校	无	正常	p	0	—
	自我防护	正常	αp	0	—
	检疫	正常	p	3	0.9
	隔离	受限	p	0	—
	综合（无隔离）	正常	αp	3	0.9
	综合	受限	αp	3	0.9
工厂	无	正常	p	0	—
	自我防护	正常	αp	0	—
	检疫	正常	p	3	0.9
	隔离	受限	p	0	—
	综合（无隔离）	正常	αp	3	0.9
	综合	受限	αp	3	0.9



2.2 人工社区、学校、工厂模型

图 4 为采用第 2.1.1 节所述模型生成的某省会城市人口地理数据库资源的部分截图,可以看出每个 agent 具有人工的人口标识(id)、性别(gender)、年龄(age)、街道办标识(street_office_id)、居民楼标识(residence_id)、社会角色(role)、关系网络(relation_net)、工作场所标识(work_id)等属性信息。从该人工城市中选择一个社区、学校、工厂建立人工社区、学校、工厂模型,用以考察这3种社会密切关注场所中不同管控措施的作用效果。人工社区、学校、工厂中的疾病病程模型和管控措施模型如第 2.1.3 节和第 2.1.4 节所述,下面对其中 agent 个体的时空接触行为模型进行描述。

2.2.1 人工社区

(1) 接触网络构建

在人工城市中选择一个 1.5 万人的典型社区,每户 2~8 人。则每户人口个体之间构成了家庭关系,从而建立起基于家庭关系的社区接触网络。为

了体现社区内除家庭外的社会关系,如亲戚、朋友等关系,选取 BA 网络^[8]的生成方法,在家庭关系网络内部不断加边,直到接触网络平均度达到 d ,具体过程如下。

(1) 增长: 从一个具有 m_0 个节点的联通网络开始,每次引入一个新的节点,连到 m 个已经存在的节点上,并且满足 $m < m_0$ 。

(2) 优先连接: n 为网络中的节点的总个数,一个新的节点与一个已经存在的节点 i 相连的概率 w 与节点 i 的度 k_i 之间的关系为:

$$w = \frac{k_i}{\sum_{i=1}^n k_i} \quad (2)$$

图 5 展现了人工社区内以家庭关系为基础和增加了亲戚、朋友等关系的接触网络结构。

(2) 空间移动网络构建

无管控措施情况下,社区居民的活动日志见表 3。

id	gender	age	street_office_id	residence_id	role	relation_net	working_id	work_latitude	eatw_id
101000001	M	21	101000000	101500001	U	<relation_net>	(Null)	(Null)	
101000002	F	20	101000000	101500001	W	<relation_net>	610527227	39.863638	21154027
101000003	F	54	101000000	101500002	W	<relation_net>	204574840	39.880457	10154494
101000004	M	56	101000000	101500002	W	<relation_net>	1508528890	39.657127	50653062
101000005	M	31	101000000	101500002	W	<relation_net>	1501522907	39.44004	10951777
101000006	M	30	101000000	101500003	W	<relation_net>	110533987	39.864433	21054849
101000007	F	23	101000000	101500004	U	<relation_net>	(Null)	(Null)	
101000008	M	24	101000000	101500004	W	<relation_net>	204574694	39.882892	10154494
101000009	M	59	101000000	101500005	R	<relation_net>	(Null)	(Null)	
101000010	F	49	101000000	101500006	W	<relation_net>	1512540214	39.753439	21154044
101000011	M	49	101000000	101500006	W	<relation_net>	205530046	39.890312	10154508
101000012	F	25	101000000	101500006	W	<relation_net>	205530589	39.889642	10154527
101000013	F	23	101000000	101500007	U	<relation_net>	(Null)	(Null)	
101000014	M	22	101000000	101500007	W	<relation_net>	1402506991	40.340043	10154497

图 4 某省会城市人工人口数据资源

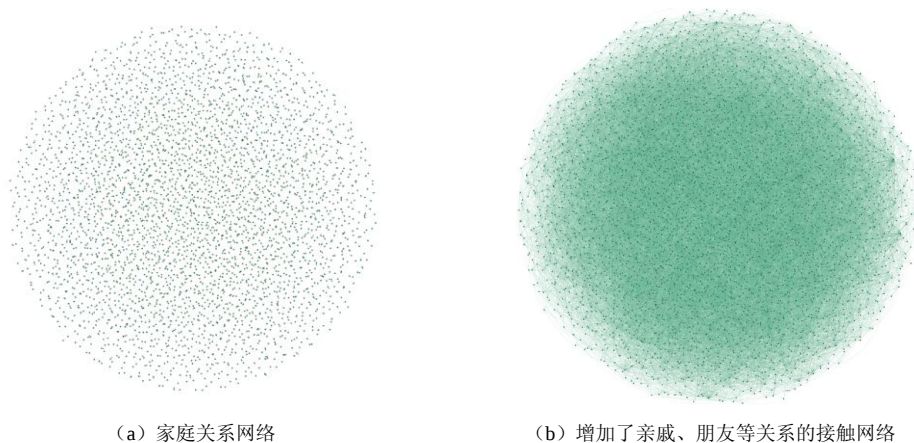


图 5 人工社区接触网络

2.2.2 人工学校

(1) 接触网络构建

选定一个典型学校, 学校内部 40~60 人一个班, 每个年级 20 个班, 一共 6 个年级。学生 4 个人一个宿舍, 同宿舍的学生本身也是同学, 这就形成了同班同学及舍友关系。此外, 利用第 2.2.1 节中的方法生成跨班级、宿舍形成的亲戚、同乡、朋友等关系。图 6 展现了人工学校内以班级、宿舍关系为基础和增加了亲戚、同乡、朋友等关系的接触网络结构。

表 3 社区居民的活动日志

持续时段	活动类型	地点	概率
00:00-08:00	睡觉	家	100%
08:00-12:00	工作	工作地点	50%
	休息	家	20%
	休闲	社区公园	20%
12:00-13:00	午饭	食堂	50%
		家	50%
13:00-17:30	工作	工作地点	50%
	休息	家	20%
	休闲	社区公园	20%
17:30-18:00	休息	家	50%
	购物	商场	45%
	健身	体育馆	5%
18:00-19:00	晚餐	家	50%
		餐馆	50%
19:00-20:00	休息	家	50%
	休闲	社区公园	20%
	娱乐	文体中心	30%
20:00-23:00	休息	家	100%
23:00-24:00	睡觉	家	100%

(2) 空间移动网络构建

无管控措施下, 学生的活动日志见表 4。

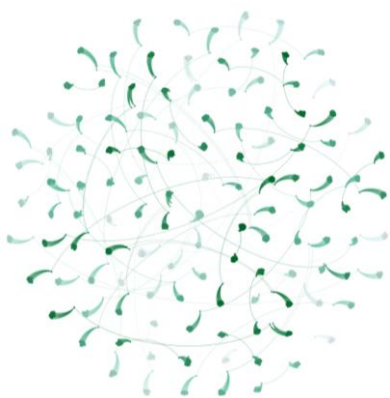
2.2.3 人工工厂

(1) 接触网络构建

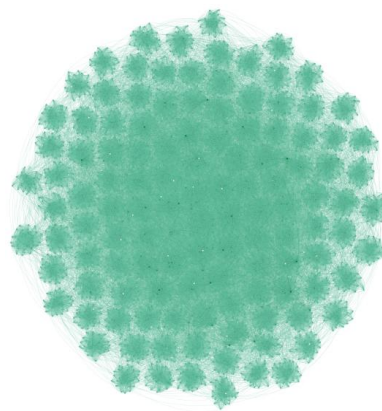
选择一个拥有 2 万人口的典型工厂, 工厂内一共有 100 个班组, 每个班组 10~30 人, 且同宿舍的 4 个人为一个班组内同事, 这就形成了同班组及同宿舍关系。此外, 利用第 2.2.1 节中的方法生成跨班组、宿舍形成的亲戚、同乡、朋友等关系。图 7 展现了人工工厂内以班组、宿舍关系为基础和增加了亲戚、同乡、朋友等关系的接触网络结构。

表 4 学生的活动日志

持续时段	活动类型	地点	概率
00:00-08:00	睡觉	宿舍	100%
08:00-12:00	自习	自习室	20%
		图书馆	30%
	上课	教室	50%
12:00-13:00	吃饭	食堂	70%
		餐馆	30%
13:00-14:00	午休	宿舍	100%
14:00-17:00	上课	教室	50%
	自习	自习室	20%
17:00-18:00		图书馆	30%
	晚饭	食堂	40%
	锻炼	操场	60%
18:00-22:00	自习	教室	50%
	休息	宿舍	50%
22:00-24:00	睡觉	宿舍	100%



(a) 班级、宿舍关系网络



(b) 增加了亲戚、同乡、朋友等关系的接触网络

图 6 人工学校接触网络

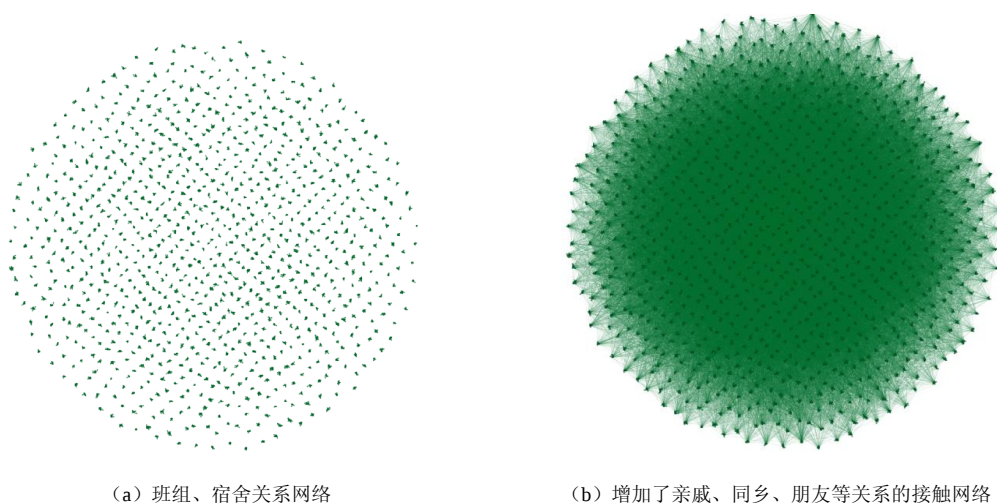


图7 人工工厂接触网络

(2) 空间移动网络构建

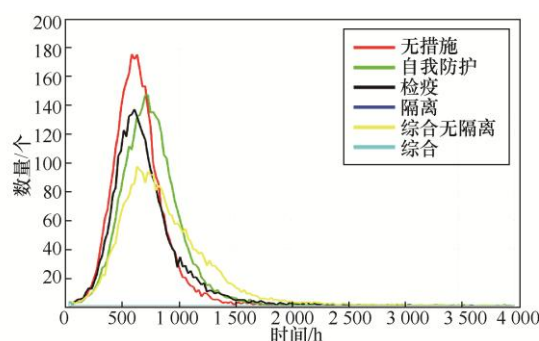
无管控措施下，工人的活动日志见表1。

3 计算实验及结果分析

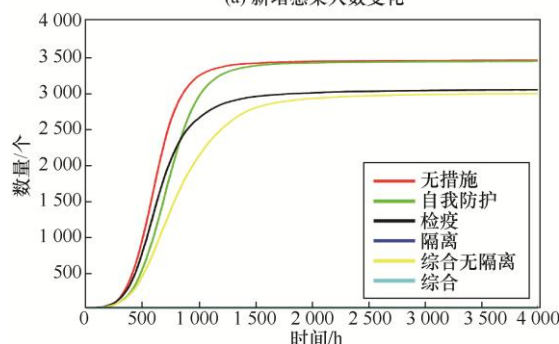
针对人工城市中的典型场所——社区、学校、工厂，进行不同管控措施下的新冠肺炎疫情计算实验，每一次计算实验仿真运行500次，计算实验结果取重复仿真的均值。在每一次计算实验中，初始感染源设为一入。

图8、图9、图10分别展示了人工社区、学校、工厂3种场所的新冠肺炎疫情计算实验结果。图8、图10中的隔离措施和综合措施下的人数变化曲线几乎重叠。可以看出，即使在只有一个感染源的情况下，不施加管控措施会导致新型冠状病毒肺炎在疫情在短时间内在社区、学校、工厂快速扩散。通过施加管控措施能够在一定程度上减小疫情的扩散强度和降低疫情的扩散速度，但作用效果不尽相同，同一个管控措施在不同场所的作用也不同。

图8显示，在人工社区内，检疫措施不仅能够有效地延缓日新增人数峰值的到来，降低新增峰值人数，同时也有效降低了累计感染人数；自我防护措施虽然也能够延缓新增感染人数峰值的到来，但是并不能有效降低地累计感染人数；隔离措施对疫情的传播速度和规模2个方面都进行了有效快速的抑制；综合措施的作用效果与隔离措施的效果非常相似，两者的人数变化曲线几乎重合；无隔离的综合措施在延缓新增人数峰值到来方面比自我防护和检疫措施的作用效果要强，但是在降低累计感染人数方面效果只比检疫措施略强。



(a) 新增感染人数变化



(b) 累计感染人数变化

图8 人工社区新型冠状病毒传播计算实验

图9、图10显示，在人工学校及人工工厂中，若管控措施中不包含隔离措施，此管控措施能够减缓新增感染人数峰值的到来，但并不能降低最终的感染人数。

比较图8、图9和图10中隔离措施、综合措施、无隔离的综合措施的实施效果，发现无论是在社区、学校还是工厂中，隔离措施对疫情的管控效果最好，能够非常快速地延缓新增感染人数峰值到来时间及降低最终累计感染人数。延缓新增感染人数峰值到来时间对新冠肺炎治愈率的提高有明显的

效果,较缓慢增长的新增感染人数能够为组织充足的医疗救援力量提供宝贵的窗口期,减小疫情对医疗资源的挤兑,从而提高救治成功率,而累计感染人数的降低意味着更多人的身体健康得到了保障。

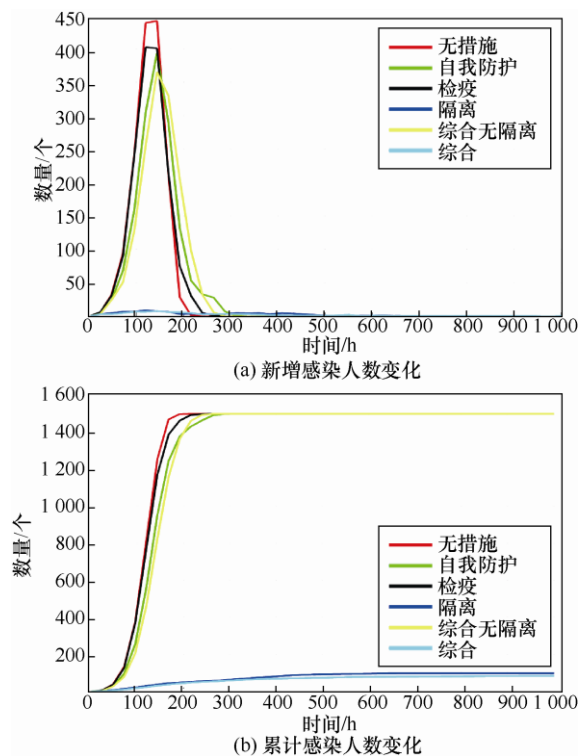


图 9 人工学校新型冠状病毒传播计算实验

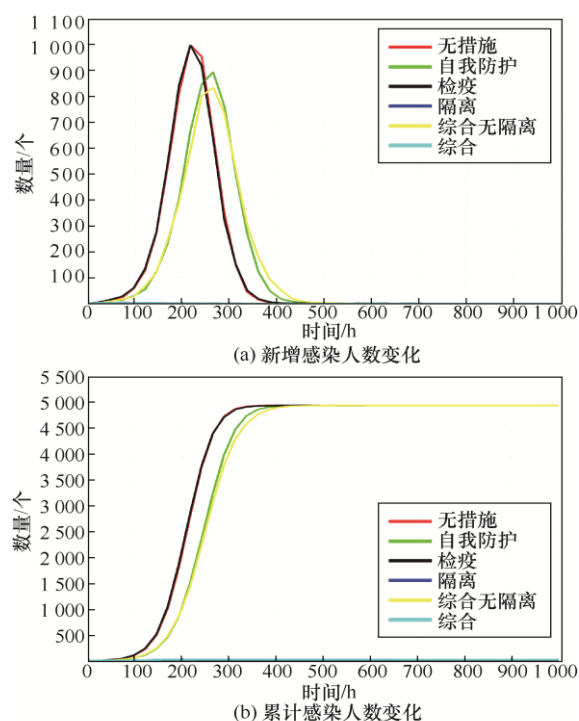


图 10 人工工厂新型冠状病毒传播计算实验

图 11 分别展示了在人工社区、学校及工厂中新型冠状病毒传播单次仿真计算实验新增感染人数变化情况。可以看出,疫情发展过程中日增感染人数不是单调递减的,疫情发展过程具有长尾效应,日增人数变化趋势是整体降低但局部反复。可以看出疫情后期的发展是整体可控但局部依然存在小规模暴发,称此种发展趋势为“大局稳定、局部冒泡”。这一疫情发展趋势与目前可控的国内疫情发展趋势是相符的。

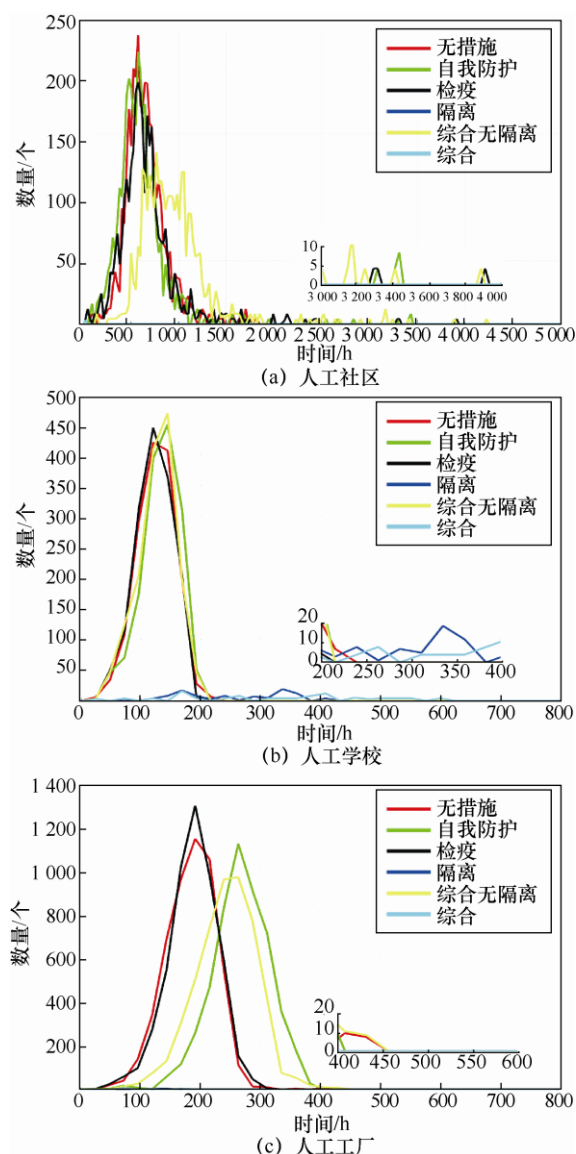


图 11 新型冠状病毒传播单次仿真计算实验新增感染人数变化

新型冠状病毒具有比 SARS 病毒、中东呼吸综合征 (MERS) 病毒更强的传染性,而且新型冠状病毒感染者在潜伏期内具有传染性,部分患者并无明显外部临床表现,导致检疫 (体温监测、核酸检

测) 手段无法甄别所有感染人群, 这些都是疫情发展“局部冒泡”的原因所在。自我防护只是降低感染率, 并没有完全阻断“人-人”传播途径, 因此降低感染率在实验中表现为疫情暴发时间延缓。只有加上全局隔离措施后, 即彻底阻断“人-人”传播才能真正有效控制疫情发展。

4 结束语

本文基于 ACP 方法, 在人工城市中分析了 3 种典型场所——社区、学校、工厂实施不同疫情管控措施对疫情发展的影响。首先, 针对不同的场所建立了基于加权双模态网络的 agent 时空接触行为, 然后建立了新冠肺炎病患的病程发展模型及管控措施模型。通过计算实验, 对自我防护、检疫、隔离 3 类措施及其综合措施进行了考查。实验结果发现, 在没有任何防护情况下, 仅一名初始感染者就能使新冠肺炎疫情在 3 种场所暴发。自我防护与检疫措施只能减缓疫情对医疗资源的挤兑, 难以有效降低总的感染人数。

隔离措施能够快速地抑制疫情发展, 其根本逻辑是阻断“人-人”传播链, 但是强力隔离措施的实施是以巨大的经济损失为代价的。考虑到病毒本身的强传染特性、较长的潜伏周期、病患的无症状特征等现实情况, 要突破现有传统检验检疫手段, 结合人工智能、大数据等手段建立高度可靠的新冠肺炎感染者筛查及潜在接触人员预警机制, 这对我国当前严防外部输入病例方面尤其重要。

未来将进一步对基于 ACP 方法的公共卫生管控措施效果评估进行研究, 探索公共卫生平行系统的平行执行, 研究实时公共卫生大数据注入人工社会的途径方法, 促进人工社会与实际社会的虚实互动, 提高预测及管控措施评估的针对性与有效性。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] WHO. Coronavirus disease 2019 (COVID-19) Situation Report-52.[R]. 2020.
- [3] 王飞跃, 王晓, 袁勇, 等. 社会计算与计算社会:智慧社会的基础与必然[J]. 科学通报, 2015, 60(5): 460-469.

- WANG F Y, WANG X, YUAN Y, et al. Social computing and computational societies: the foundation and consequence of smart societies[J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(5): 460-469.
- [4] WANG F. Toward a paradigm shift in social computing: the ACP approach[J]. IEEE Intelligent Systems, 2007, 22(5): 65-67.
- [5] DUAN W, FAN Z C, ZHANG P, et al. Mathematical and computational approaches to epidemic modeling: a comprehensive review[J]. Frontiers of Computer Science, 2015, 9(5): 806-826.
- [6] SIETTOS C I, RUSSO L. Mathematical modeling of infectious disease dynamics[J]. Virulence, 2013, 4(4): 295-306.
- [7] MAIA J O C D. Some mathematical developments on the epidemic theory formulated by reed and frost[J]. Human Biology, 1952, 24(3): 167-200.
- [8] 汪小帆, 李翔, 陈关荣. 网络科学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.
WANG X F, LI X, CHEN G R. Introduction to network science[M]. Beijing: Higher Education Press, 2012.
- [9] CARLEY K M, FRIDSMA D B, CASMAN E, et al. BioWar: scalable agent-based model of bioattacks[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans, 2006, 36(2): 252-265.
- [10] BARRETT C L, BISSET K R, EUBANK S G, et al. EpiSimdemics: an efficient algorithm for simulating the spread of infectious disease over large realistic social networks[C]//Proceedings of the 2008 ACM/IEEE Conference on Supercomputing. Piscataway: IEEE Press, 2008: 37.
- [11] CHAO D L, HALLORAN M E, OBENCHAIN V J, et al. FluTE, a publicly available stochastic influenza epidemic simulation model[J]. PLoS Computational Biology, 2010, 6(1): e1000656.
- [12] 段伟. 基于异质 agent 的疾病传播建模与计算实验[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
DUAN W. Heterogeneous agent-based modeling and computational experiments of infectious disease transmission[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014.
- [13] YANG Z F, ZENG Z Q, WANG K, et al. Modified SEIR and AI prediction of the epidemics trend of COVID-19 in China under public health interventions[J]. Journal of Thoracic Disease, 2020, 12(3): 165-174.
- [14] 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 modeling analysis[J]. Scientia Sinica Mathematica, 2020, 50: 1-10.
- [15] CAI Y, WANG H W, WANG Z Z, et al. Phase-adjusted estimation of the number of Coronavirus Disease 2019 cases in Wuhan, China[J]. Cell Discovery, 2020, 6: 1-10.
- [16] AL-QUNESS M A A, EWEES A A, FAN H, et al. Optimization method for forecasting confirmed cases of COVID-19 in China[J]. Journal of Clinical Medicine, 2020, 9(3): 674.
- [17] GE Y Z, MENG R Q, CAO Z D, et al. Virtual city: an individual-based digital environment for human mobility and interactive behavior[J]. Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International, 2014, 90(8): 917-935.
- [18] DUAN W, CAO Z D, WANG Y Z, et al. An ACP approach to public health emergency management: using a campus outbreak of H1N1 influenza as a case study[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2013, 43(5): 1028-1041.
- [19] ZHANG P, CHEN B, MA L, et al. The large scale machine learning in

an artificial society: prediction of the Ebola outbreak in Beijing[J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2015: 1-12.

- [20] 葛渊峰. 基于 agent 的人工社会框架设计与生成方法[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.

GE Y Z. An agent-based framework and generation of an artificial society[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014.

- [21] LI Q, GUAN X H, WU P, et al. Early transmission dynamics in Wuhan, China, of Novel coronavirus-infected pneumonia[J]. New England Journal of Medicine, 2020. (Accepted).

- [22] GUAN W J, NI Z Y, HU Y, et al. Clinical characteristics of 2019 novel coronavirus infection in China[J]. medRxiv, 2020. (Accepted).

- [23] CHEN B, ZHANG L B, GUO G, et al. KD-ACP: a software framework for social computing in emergency management[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015: 1-27.

[作者简介]



马亮 (1990—), 男, 博士, 国防科技大学北京学科交叉中心助理研究员, 主要研究方向为系统仿真、多 agent 建模仿真、人群疏散建模仿真、公共卫生应急管理。



杨妹 (1985—), 女, 博士, 国防科技大学系统工程学院副研究员, 主要研究方向为复杂系统建模与仿真、并行与分布仿真等。



艾川 (1991—), 男, 国防科技大学系统工程学院博士生, 主要研究方向为舆情传播的建模和仿真。



朱正秋 (1994—), 男, 国防科技大学系统工程学院博士生, 主要研究方向为城市计算、群智感知、博弈论及应急管理仿真。



陈海亮 (1996—), 男, 国防科技大学系统工程学院硕士生, 主要研究方向为复杂网络、链路预测、图神经网络在社交网络研究中的应用。



朱蒙娜 (1998—), 女, 国防科技大学系统工程学院本科生, 主要研究方向为复杂网络中社团结构的划分以及网络的构建。



段伟 (1983—), 男, 博士, 国防科技大学系统工程学院副教授, 主要研究方向为复杂社会系统建模与仿真、疾病传播模型与传播理论、复杂网络、社会计算、公共卫生应急管理、并行与分布式仿真、平行仿真、多 agent 建模仿真。



邱晓刚 (1963—), 男, 博士, 国防科技大学系统工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为应急管理、公共卫生、多 agent 建模仿真、知识工程、平行控制、系统仿真。



吕欣 (1984—), 男, 博士, 国防科技大学系统工程学院教授, 主要研究方向为大数据挖掘与应急管理、复杂网络与流行病学、人类行为动力学。



陈彬 (1981—), 男, 博士, 国防科技大学系统工程学院副研究员, 主要研究方向为基于 ACP 的仿真运行支撑、平行实验方法。