

基于智能体建模的新冠肺炎疫情传播问题研究

项凤涛, 苏炯铭, 谷学强, 张万鹏

(国防科技大学智能科学学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 针对新型冠状病毒肺炎 (COVID-19) 疫情传播及防控相关问题, 基于智能体建模思想对 COVID-19 疫情进行研究。首先基于 COVID-19 传播机理在 NetLogo 平台建立数学模型, 模拟疫情传播的真实过程; 其次分析评估不同因素 (如疫情防控措施, 人群走动方式, COVID-19 潜伏期、治愈期和死亡率等) 对疫情传播的影响, 以了解影响疫情态势的核心因素; 进而分析和总结疫情传播的内在规律。

关键词: 智能体建模; 新型冠状病毒肺炎; 防控措施; 因素评估

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.202308

Research on the spread and countermeasures of COVID-19 using agent-based modeling

XIANG Fengtao, SU Jiongming, Gu Xueqiang, ZHANG Wanpeng

College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

Abstract: Aiming at the problems related to the spread and prevention and control of COVID-19, the COVID-19 epidemic was studied based on agent based modeling thought. Firstly, based on the COVID-19 transmission mechanism, a mathematical model was established on the NetLogo platform to simulate the real process of epidemic spread. Secondly, the impacts of different factors (such as epidemic prevention and control measures, population migration patterns, COVID-19 incubation period, cure period and mortality) were analyzed and evaluated on the spread of the epidemic, so as to understand the core factors affecting the epidemic situation. Then, the internal law of the epidemic spread was analyzed and summarized.

Key words: agent-based modeling, COVID-19, prevention and control measures, factor evaluation

0 引言

新型冠状病毒是 2019 年年底发现的一种具有很强传染性的冠状病毒毒株, 世界卫生组织将由此种新型冠状病毒引发的肺炎命名为新型冠状病毒肺炎 (COVID-19)。COVID-19 对世界经济、政治乃至文化造成了巨大影响。

针对新冠肺炎疫情传播及防控相关问题, 本文基于智能体建模 (agent-based modeling, ABM) 思

想对 COVID-19 疫情传播规律进行研究。首先基于 COVID-19 传播机理在 NetLogo 平台建立数学模型, 模拟疫情传播的真实过程; 其次分析评估不同因素 (如疫情防控措施, 人群走动方式, COVID-19 潜伏期、治愈期和死亡率等) 对疫情传播的影响, 以了解影响疫情态势的核心因素; 进而分析和总结疫情传播的内在规律。

后文组织结构如下: 首先对 COVID-19 疫情传播与防控问题进行建模, 包括相关研究情况、建模

收稿日期: 2023-01-30; 修回日期: 2023-02-17

通信作者: 项凤涛, xiangfengtao@nudt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61603403, No.U1734208); 湖南省自然科学基金资助项目 (No. 2021JJ40693)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61603403, No.U1734208), The Natural Science Foundation of Hunan Province (No.2021JJ40693)

方法及过程、智能体类型及状态转化等；然后进行计算机仿真实验，并对实验结果进行分析；最后是全文总结与展望。

1 问题建模

1.1 已有研究

传统的疫情建模方法多基于“自顶向下”的思想^[1-2]，该类方法通过对疫情数据的整体分析抽象出疫情传播的宏观数学模型，在鼠疫、天花、流行性感冒和病毒性肝炎等传染病防控中发挥了重大作用。通常，该类方法可以通过调整模型参数来拟合疫情数据，在疫情防控和预测方面发挥了重要作用，典型的疫情传播模型有 SI 模型、SIS 模型、SIR 模型、SEIR 模型等^[3-4]。然而，该类疫情建模方法从根本上属于宏观抽象，其数学模型直接源于疫情数据，而没有考虑疫情传播的过程和内在规律，通常无法准确地描述群体所具有的“涌现”现象。

ABM 作为研究复杂系统的重要方法和技术工具之一，在过去的二三十年间取得了长足的进步^[5-6]。ABM 采用“自底向上”的建模思想，通过对个体的系列行为进行描述，将微观个体的局部行为推演为宏观群体的系统现象，能够从机理层面较好地解释群体展现出的“涌现”现象。由于 ABM 采用自底向上的建模思想，因此具有拓展性好、模型实现简单等优势，现已被广泛用于疫情防控领域。

围绕疫情防控，潘理虎等人^[7]以山西省太原市为例，基于 ABM 构建 COVID-19 疫情防控模型，研究了人员流动、防护措施和医疗救治措施等对疫情防控的影响。朱翌民等人^[8]对传统的 SEIR 模型进行改进，提出了一种带有隔离措施的 SEIR 模型，对疫情发展进行了预测。曹中浩等人^[9]将复杂网络理论和地理信息系统 (geographical information system, GIS) 结合，建立了基于 ABM 的 COVID-19 疫情仿真模型，实现了对广州市疫情数据的准确拟合。王建伟等人^[10]应用广义 SEIR 模型，对疾病传播参数进行估计，实现了不同防控级别下 COVID-19 疫情传播的模拟。黄梦瑶等人^[11]利用 SEIRS 模型，以 4 个国家为例研究了隔离时间和隔离程度对 COVID-19 疫情态势的影响。丁莹等人^[12]构建基于 ABM 的 COVID-19 疫情城市仿真模型，对武汉市疫情及不同强度防疫措施下的感染情况进行了仿真。上述研究实现了对 COVID-19 疫情

的预测或仿真，并探讨了佩戴口罩、隔离等措施对疫情防控的影响，但没有评估疫情防控措施、人群走动方式和 COVID-19 潜伏期等因素对疫情防控的影响，指导性存在局限。

1.2 建模过程

COVID-19 疫情是一个复杂的系统级现象，主要通过个体之间的交叉聚集进行传播。由前述分析可知，直接基于疫情数据对 COVID-19 进行“自顶向下”的建模存在较大偏差且可解释性不强。为此本文采用“自底向上”的思想，从疫情传播智能体的视角对 COVID-19 疫情传播过程进行建模。

根据 COVID-19 疫情的特点，其传播过程可划分为易感（密切接触）、潜伏、发病、免疫和死亡 5 个部分，COVID-19 疫情传播的基本原理如图 1 所示。

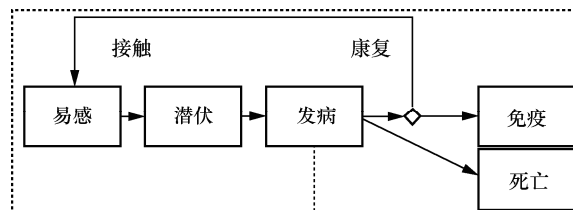


图 1 COVID-19 疫情传播的基本原理

在本模型中，COVID-19 疫情传播模型用于模拟一定区域内、一定数量易感人群的 COVID-19 疫情传播过程，其中病毒随着易感人群与病毒携带者之间的交叉聚集而自发扩散。假定易感人群与病毒携带者密切接触后被设置为密接者，易感人群携带病毒但未发病的个体被设置为潜伏者，易感人群携带病毒且发病的个体被设置为感染者。

根据病毒的传染力不同，密接者以一定的概率被传染，并定义该概率为病毒传染力。值得注意的是，易感人群感染 COVID-19 后并不会马上发病，而是要经过一段时间后才表现出症状，在本模型中定义该时间段为潜伏期。通常潜伏期的长度随毒株的变异而变化。一般而言潜伏期越长，疫情防控的难度也就越大。值得注意的是，潜伏者没有任何症状，其行为特征与易感人群完全一样，然而却具有与感染者完全相同的传染力。

潜伏者经过潜伏期后就会表现出咳嗽、发烧等症状，并转变为感染者。为了阻断疫情传播，人们通常会采取佩戴口罩、消杀、隔离等措施来降低被传染的风险。因此，在本模型中上述防疫措施的作用可以等效建模为病毒的传染力下降。

感染者经过一段时间的治疗后,要么康复后获得免疫能力,要么治疗无效后死亡,定义该时间段为康复期。由于 COVID-19 危及患者生命,通常需要安排到指定医院进行隔离救治,要占用大量的医疗资源。疫情数据表明,COVID-19 感染者的死亡概率与年龄密切相关。一般而言,感染者的年龄越大,死亡率也就越高。

1.3 智能体类型与状态转化

模型中包含易感人群、潜伏者、感染者、康复者和死亡者 5 类智能体,状态转变关系如图 2 所示。

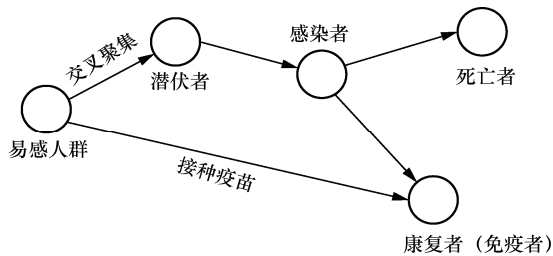


图2 COVID-19 疫情人群状态转变关系

为了模拟易感人群的交叉聚集活动,在特定区域分别定义智能体 3 类走动方式,具体如下。

(1) 随机走动: 智能体以一定速度在整个区域内随机走动。

(2) 聚集走动: 智能体以一定速度围绕某个智能体聚集走动。

(3) 随机走动+聚集走动: 智能体以一定速度按照走动形式(1)和走动形式(2)在整个区域内交替走动。

将上述 3 种走动方式的速度设置为 v , 当易感者与潜伏者或感染者接触后,易感者以概率 p_1 (病毒传染力) 被传染。易感者携带病毒后将马上转化为潜伏者,潜伏期的长度服从均匀分布,随机分布在区间 $[0, T_1]$, 其中 T_1 为最长潜伏期。潜伏期过后,所有的潜伏者都将变为感染者,具有异常症状。理论上,潜伏者和感染者均需要被及时发现并转移至特定医院进行隔离救治,以最大限度降低死亡率。类似地,康复期的长度服从均匀分布,随机分布在区间 $[0, T_2]$, 其中 T_2 为最长康复期。

值得注意的是,感染者康复后将携带抗体,具有免疫功能。但并非所有的感染者都能治愈,仍有一部分感染者以概率 p_2 (死亡率) 面临死亡。为了最大限度地降低死亡率,政府通常会组织易感人群接种疫苗以获得免疫,降低被 COVID-19 感染的风险。

2 实验结果及分析

本文在 NetLogo 平台建立 COVID-19 疫情传播模型,在此基础上采用控制变量法依次分析病毒传染力、潜伏期长度、人口走动方式和防疫措施(佩戴口罩/消杀)等因素对 COVID-19 疫情传播的影响,仿真实验从接种疫苗比率的角度分析了新冠肺炎疫情传播问题。

2.1 参数设置

模型在 NetLogo 平台实现,设定区域的大小为 $121 \text{ km} \times 121 \text{ km}$, 最大人口总数为 5 000 人。人口初始位置随机分布在整个区域,人口走动速度 $v=5 \text{ km/h}$, 人口走动方式从 3 种预设方式中选择,人口年龄均匀分布在 0~120 岁,初始感染病例数为 1,最长康复期 $T_2=14$ 天。参照国家卫生健康委员会数据,易感人群不同年龄段感染 COVID-19 后的死亡率见表 3。

表3 易感人群不同年龄段感染 COVID-19 后的死亡率

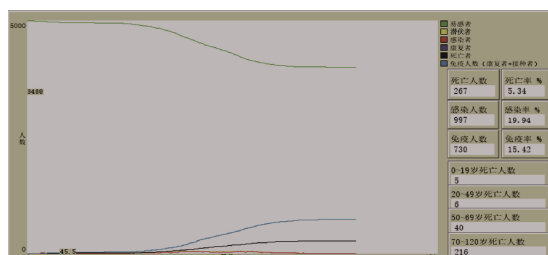
年龄	死亡率
0~19 岁	0.2%
20~49 岁	0.3%
50~69 岁	3.6%
70 岁以上	9.7%

2.2 病毒传染力对疫情的影响

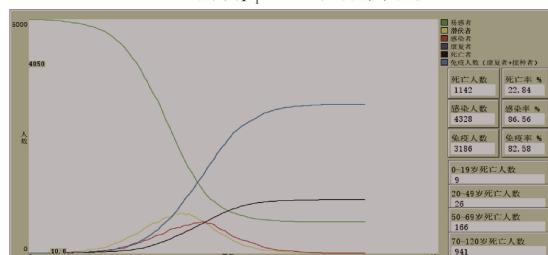
截至研究进行时,COVID-19 变异株主要有 3 个:阿尔法、德尔塔和奥密克戎,其中奥密克戎毒株是当时全球流行的主流变异株。随着毒株的变异,病毒的传播能力更强,传播速度更快,免疫逃逸能力也更高。为了研究病毒传染力对疫情的影响,实验参数设置如下:最长潜伏期 $T_1=14$ 天,走动方式为随机走动,不采取任何防疫措施,易感人群不接种疫苗。图 3 (a)、(b)、(c) 依次给出了病毒传染力 p_1 分别为 30%、60%和 90%时的仿真结果。

对比图 3 (a)、(b)、(c) 可知,病毒传染力对疫情传播具有重要影响。一方面,随着病毒传播能力的增强,死亡人数(死亡率)、感染人数(感染率)、免疫人数(免疫率)均出现不同程度的增加(提高);另一方面,病毒传染力还影响疫情的持续时间。图 3 (a) 表明当病毒的传染力较低时,疫情的扩散和传播速度较慢,疫情的持续时间被延长。图 3 的仿真结果表明,COVID-19 的传染力越强,感染率就越高,死亡人数也就越多,且死亡人群以

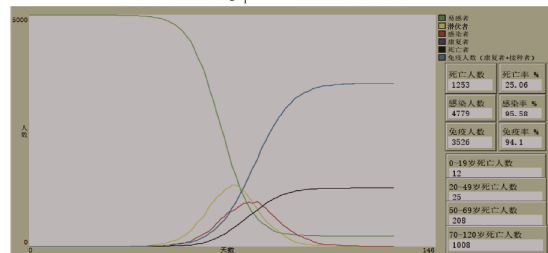
50~120岁人群为主体,疫情越有可能出现急剧式爆发,造成医疗挤兑现象。将图3中的仿真结果与当时全球疫情防控实况进行对照(模拟因 COVID-19 变异传染力 p_1 增强)可知,仿真结果与实际情况相吻合,验证了实验设计的合理性。



(a) 传染力 $p_1=30\%$ 时的仿真结果



(b) 传染力 $p_1=60\%$ 时的仿真结果



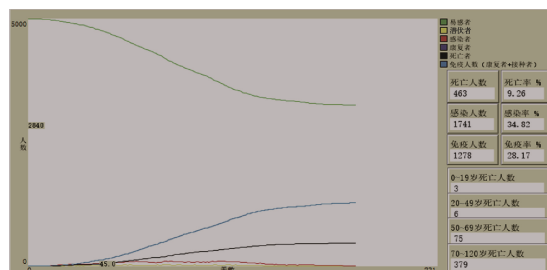
(c) 传染力 $p_1=90\%$ 时的仿真结果

图3 病毒传染力 p_1 对疫情防控的影响

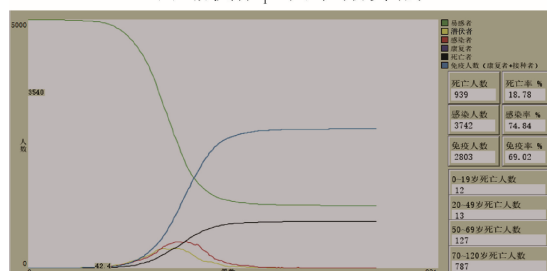
2.3 潜伏期长度对疫情的影响

为了研究病毒潜伏期长度对疫情的影响,实验参数设置如下:病毒传染力为 $p_1=60\%$,走动方式为随机走动,不采取任何防疫措施,易感人群不接种疫苗。图4(a)、(b)、(c)依次给出了病毒潜伏期长度 T_1 分别为3天、9天和14天时的仿真结果。

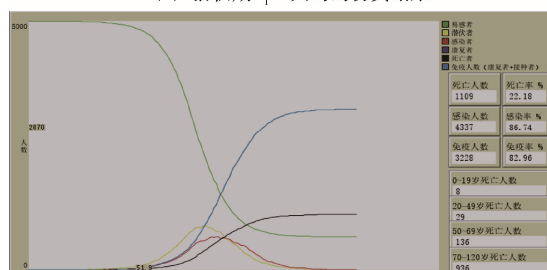
对比图4(a)、(b)、(c)可知,病毒潜伏期同样对疫情传播具有重要影响。可以发现,随着病毒潜伏期的增长,死亡人数(死亡率)、感染人数(感染率)、免疫人数(免疫率)均出现不同程度的增加(提高)。这是因为病毒的潜伏期越长,潜伏者与易感群体交叉聚集的可能性就越大,易感人群就越有可能被传染。由实验结果可以推断,当病毒潜伏期固定时,要尽可能及时发现潜伏者,以避免潜伏者与易感人群大量接触造成的聚集性感染。



(a) 潜伏期 $T_1=3$ 天时的仿真结果



(b) 潜伏期 $T_1=9$ 天时的仿真结果



(c) 潜伏期 $T_1=14$ 天时的仿真结果

图4 病毒潜伏期 T_1 对疫情防控的影响

2.4 人群走动方式对疫情的影响

为了研究人群走动方式对疫情的影响,实验参数设置如下:病毒传染力 $p_1=60\%$,最长潜伏期 $T_1=14$ 天,不采取任何防疫措施,易感人群不接种疫苗。图5(a)与(b)、图5(c)与(d)、图5(e)与(f)分别给出了“随机走动”“聚集走动”和“随机走动+聚集走动”3种走动方式的人群空间位置分布和疫情仿真结果。

对比图5(a)、(c)、(e)可知,不同的人群走动方式对应不同的人口空间位置分布,也对应不同的 COVID-19 感染情况。从 COVID-19 感染的情况来看,3种走动方式的交叉聚集性按照“随机走动+聚集走动”“随机走动”“聚集走动”的顺序依次下降。对比图5(b)、(d)、(f)可知,人群走动方式对疫情传播同样具有重要影响,3种走动方式的死亡人数(死亡率)、感染人数(感染率)、免疫人数(免疫率)按照“随机走动+聚集走动”“随机走动”“聚集走动”的顺序依次减少(下降)。

综合图5可知,易感者与病毒携带者交叉聚集是疫情传播的重要环节,二者能否交叉聚集是疫情

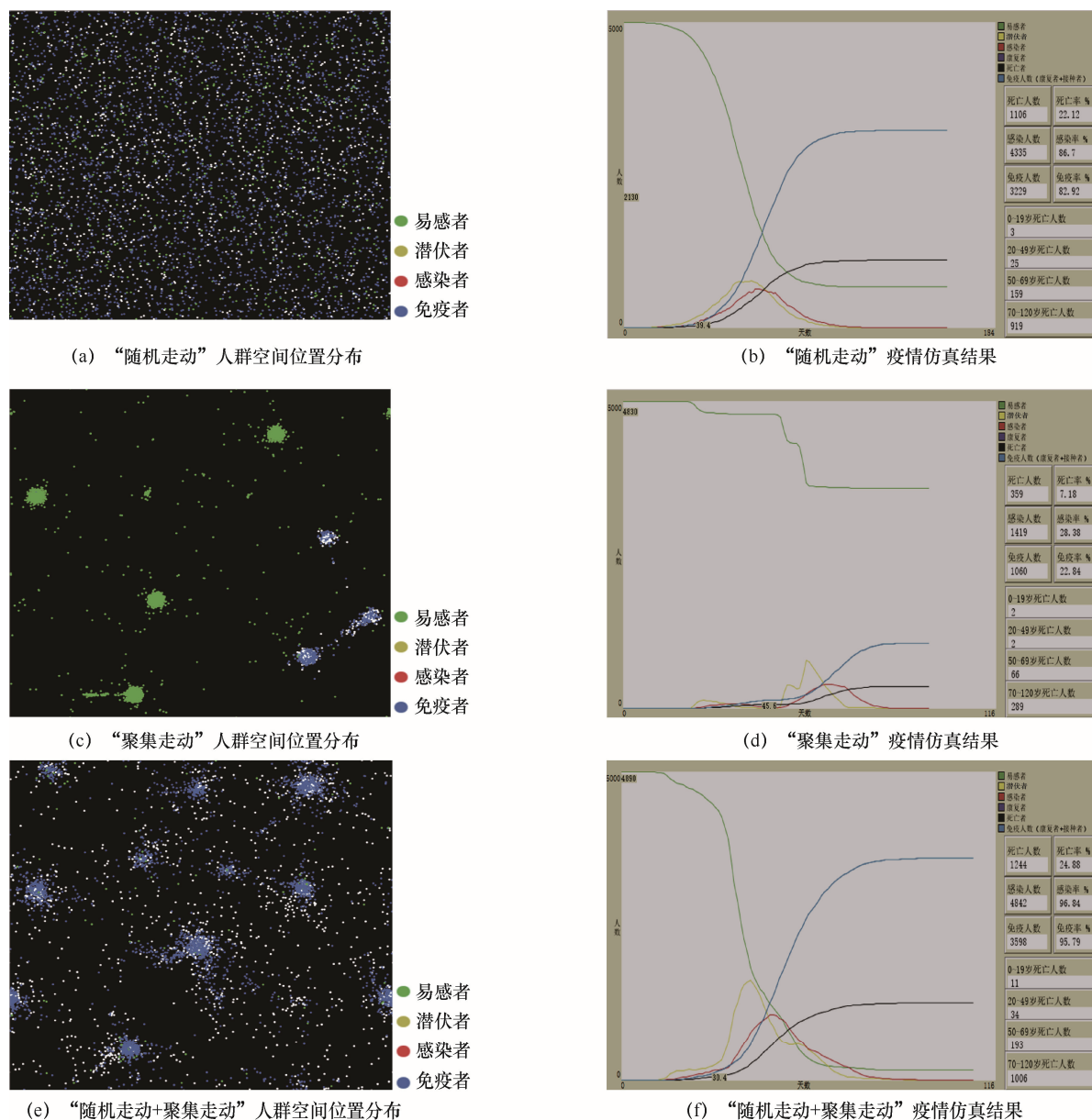


图5 人群走动方式对疫情防控的影响

能否蔓延的关键。换言之，易感者与病毒携带者的交叉聚集程度直接决定了疫情的发展态势。另外，由图 5 (c)、(d) 还可以得出结论：避免易感人群与病毒携带者的交叉聚集是阻断疫情传播的重要手段。

2.5 佩戴口罩/消杀等防护措施对疫情的影响

佩戴口罩/消杀等措施能够有效降低潜伏者和感染者将病毒传染给易感人群的概率。从防疫效果上来看，佩戴口罩/消杀等措施的作用好比降低了病毒的传染力。为此在本实验中将佩戴口罩/消杀措施等造成的影响等效为病毒传染力下降，因而该部分的仿真实验与“病毒传染力对疫情的影响”部分的

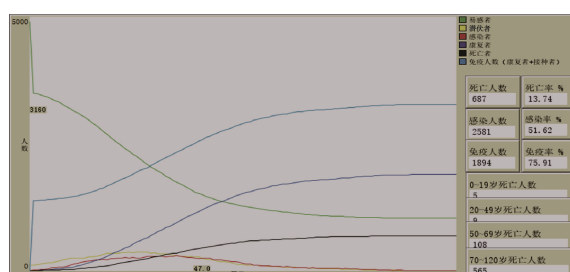
仿真实验相同，不再赘述。理论推断可知，佩戴口罩/消杀等措施能够有效降低病毒的传染风险，对疫情防控具有重要作用。

2.6 疫苗接种比例对疫情的影响

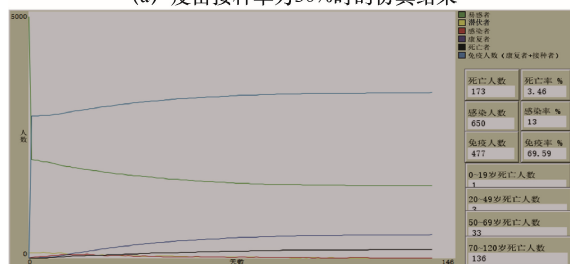
为了研究疫苗接种比例对疫情的影响，本实验将初始病例数目设置为 100。实验参数设置如下：病毒传染力 $p_1=60\%$ ，最长潜伏期 $T_1=14$ 天，走动方式为随机走动，不采取任何防疫措施。图 6 (a)、(b)、(c) 依次给出了疫苗接种率为 30%、60%和 90%时的仿真结果。

对比图 6 (a)、(b)、(c) 可知，在初始感染病例为 100 例的情况下接种疫苗可以有效缓解疫情的

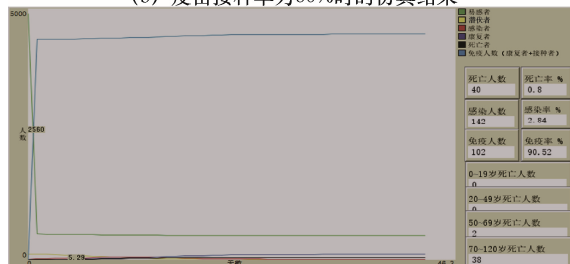
发展态势。当疫苗接种率为30%时,人群的死亡率、感染率和免疫率分别为13.74%、51.62%和75.91%;当疫苗接种率为60%时,人群的死亡率、感染率和免疫率分别为3.46%、13.00%和69.59%;当疫苗接种率为90%时,人群的死亡率、感染率和免疫率分别为0.8%、2.84%和90.52%。对比疫情数据可以发现,接种疫苗可以有效降低易感人群的感染率,从而极大程度地降低死亡人数,保证人民的生命安全。通过实验还可以发现,接种疫苗是实现免疫的另一个有效途径,该途径相比于易感人群通过感染病毒后获得抗体更具有优势。



(a) 疫苗接种率为30%时的仿真结果



(b) 疫苗接种率为60%时的仿真结果



(c) 疫苗接种率为90%时的仿真结果

图6 疫苗接种率对疫情防控的影响

3 结束语

本文根据 COVID-19 疫情的传播机理,采用基于“自底向上”的 ABM 建模思想,在 NetLogo 平台上建立了 COVID-19 疫情传播模型,定义了5类智能体的行为和状态转移规范,在此基础上依次分析了病毒传染力、潜伏期长度、人口走动方式、防疫措施(佩戴口罩/消杀)以及疫苗接种比例因素对 COVID-19 疫情传播的影响。通过实验得出以下结论。

(1) 病毒传染力越强,死亡人数(死亡率)、感染人数(感染率)和免疫人数(免疫率)就越多(高)。此外,病毒传染力越强,疫情越有可能急剧爆发,导致医疗挤兑现象。

(2) 病毒潜伏期越长,潜伏者与易感群体交叉聚集的机会就越多,易感人群就越有可能被传染,导致死亡人数(死亡率)、感染人数(感染率)和免疫人数(免疫率)越多(高)。

(3) 易感人群的走动方式对疫情发展态势具有重要影响,3种走动方式的死亡人数(死亡率)、感染人数(感染率)、免疫人数(免疫率)按照“随机走动+聚集走动”“随机走动”“聚集走动”依次下降。

(4) 佩戴口罩/消杀等防疫措施以及接种疫苗均可以有效缓解疫情的发展态势。接种疫苗是实现免疫的有效途径,疫苗的接种比例越高,死亡人数(死亡率)、感染人数(感染率)和免疫人数(免疫率)就越少(低)。

(5) COVID-19 疫情中,50岁以上的易感人群为弱势群体,其死亡病例数占死亡病例总数的90%以上,应予以重点关注。

参考文献:

- [1] ISLAM M N, INAN T T, RAFI S, et al. A systematic review on the use of AI and ML for fighting the COVID-19 pandemic[J]. IEEE Transactions on Artificial Intelligence, 2020, 1(3): 258-270.
- [2] 马亮, 杨妹, 艾川, 等. 基于 ACP 方法的新型冠状病毒肺炎疫情管控措施效果评估[J]. 智能科学与技术学报, 2020, 2(1): 88-98.
MA L, YANG M, AI C, et al. The evaluation of the control measures for COVID-19 based on ACP approach[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2020, 2(1): 88-98.
- [3] SIETTOS C I, RUSSO L. Mathematical modeling of infectious disease dynamics[J]. Virulence, 2013, 4(4): 295-306.
- [4] JENNESS S M, GOODREAU S M, MORRIS M. EpiModel: an R package for mathematical modeling of infectious disease over networks[J]. Journal of Statistical Software, 2018, 84: 8.
- [5] JACKSON J, LEWIS K, NORTON M, et al. Agent-based modeling: a guide for social psychologists[J]. Social Psychological and Personality Science, 2016, 8(4): 387-395.
- [6] SMITH E R, CONREY F R. Agent-based modeling: a new approach for theory building in social psychology[J]. Personality and Social Psychology Review: an Official Journal of the Society for Personality and Social Psychology, Inc, 2007, 11(1): 87-104.
- [7] 潘理虎, 秦世鹏, 李晓文, 等. COVID-19 病毒防控多智能体仿真模型[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(11): 2244-2257.

PAN L H, QIN S P, LI X W, et al. Multi-agent simulation model for COVID-19 virus prevention and control[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(11): 2244-2257.

- [8] 朱翌民, 黄勃, 王忠震, 等. 隔离措施对 COVID-19 疫情控制的模型分析[J]. 武汉大学学报(理学版), 2020, 66(5): 442-450.

ZHU Y M, HUANG B, WANG Z Z, et al. Analysis of the isolation measure on the control model of COVID-19[J]. Journal of Wuhan University (Natural Science Edition), 2020, 66(5): 442-450.

- [9] 曹中浩, 张健钦, 杨木, 等. 基于 GIS 新冠智能体仿真模型及应用: 以广州市为例[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(2): 297-306.

CAO Z H, ZHANG J Q, YANG M, et al. The city agent model of COVID-19 based on GIS and application: a case study of Guangzhou[J]. Journal of Geo-Information Science, 2021, 23(2): 297-306.

- [10] 王建伟, 崔秩玮, 潘满雄, 等. 基于广义 SEIR 模型的新冠肺炎传播机制及干预效果仿真[J]. 科技导报, 2020, 38(22): 130-138.

WANG J W, CUI Z W, PAN X X, et al. Simulation of COVID-19 propagation and transmission mechanism and intervention effect based on generalized SEIR model[J]. Science & Technology Review, 2020, 38(22): 130-138.

- [11] 黄梦瑶, 黄丽达, 袁宏永, 等. 社交隔离对 COVID-19 的发展影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(2): 96-103.

HUANG M Y, HUANG L D, YUAN H Y, et al. Effects of social isolation on COVID-19 trends[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(2): 96-103.

- [12] 丁莹, 张健钦, 杨木, 等. 新冠疫情发生城市仿真模型及防控措施评价: 以武汉市为例[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(12): 1452-1461.

DING Y, ZHANG J Q, YANG M, et al. Communicable disease transmission model for the prevention and control of COVID-19 in Wuhan City, China[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(12): 1452-1461.

[作者简介]



项凤涛(1986—), 男, 博士, 国防科技大学智能科学学院副教授, 主要研究方向为智能辅助决策、不确定性推理、模式识别、机器学习。



苏炯铭(1984—), 男, 博士, 国防科技大学智能科学学院副研究员, 主要研究方向为可解释人工智能、智能博弈。



谷学强(1983—), 男, 博士, 国防科技大学智能科学学院副研究员, 主要研究方向为智能规划与决策、智能控制。



张万鹏(1981—), 男, 博士, 国防科技大学智能科学学院研究员, 主要研究方向为智能决策、任务规划、自动化和控制、人机协同。