

11-17-2020

## Multi-agent Simulation Model for COVID-19 Virus Prevention and Control

Lihu Pan

*College of Computer Science and Technology, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;*

Shipeng Qin

*College of Computer Science and Technology, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;*

Xiaowen Li

*College of Computer Science and Technology, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;*

Feiping Lu

*College of Computer Science and Technology, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, 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.

---

# Multi-agent Simulation Model for COVID-19 Virus Prevention and Control

## Abstract

**Abstract:** The prevention and control of the novel coronavirus (COVID-19) is the priority work to maintain the public health security of the world nowadays. *The COVID-19 prevention and control model using multi-agent modeling and simulation technology is proposed.* The model can simulate the different dynamic development trend of the epidemic under different prevention and control measures. Taking Taiyuan as an example, *according to the researched COVID-19 transmission rules, the prevention and control simulation of COVID-19 has been achieved under the designing rule of the interactive infection process and status transition process between various resident agents. Multi-scenario simulation experiments are realized under different policy measures of hospital and government.* The experimental results show that the multi-agent modeling method is effective in analyzing the spread of COVID-19 and can provide decision support for city epidemic prevention and control.

## Keywords

new coronavirus transmission, urban epidemic prevention and control, multi-agent modeling, public health safety, virus prevention and control strategy

## Authors

Lihu Pan, Shipeng Qin, Xiaowen Li, Feiping Lu, and Fenyu Yang

## Recommended Citation

Pan Lihu, Qin Shipeng, Li Xiaowen, Lu Feiping, Yang Fenyu. Multi-agent Simulation Model for COVID-19 Virus Prevention and Control[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(11): 2244-2257.

# COVID-19 病毒防控多智能体仿真模型

潘理虎, 秦世鹏, 李晓文, 芦飞平, 杨芬玉

(太原科技大学 计算机科学与技术学院, 山西 太原 030024)

**摘要:** 新型冠状病毒(COVID-19)的防控是当前维护世界公共卫生安全的重点工作, 据此提出运用多智能体建模仿真技术构建 COVID-19 病毒防控模型, 以模拟在不同防控措施下的疫情动态发展趋势。以太原市为例, 依据已发现的 COVID-19 病毒传播规律, 制定各类居民智能体之间的交互传染与状态转换规则, 实现了 COVID-19 病毒传播的防控决策仿真模型, 在政府和医院的不同政策措施下进行了多情景仿真实验。实验结果表明多智能体建模方法可有效分析新型冠状病毒传播趋势, 为城市疫情防控提供决策支持。

**关键词:** 新型冠状病毒传播; 城市疫情防控; 多智能体建模; 公共卫生安全; 病毒防控策略  
中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2020) 11-2244-14  
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0312

## Multi-agent Simulation Model for COVID-19 Virus Prevention and Control

Pan Lihu, Qin Shipeng, Li Xiaowen, Lu Feiping, Yang Fenyu

(College of Computer Science and Technology, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** The prevention and control of the novel coronavirus (COVID-19) is the priority work to maintain the public health security of the world nowadays. *The COVID-19 prevention and control model using multi-agent modeling and simulation technology is proposed.* The model can simulate the different dynamic development trend of the epidemic under different prevention and control measures. Taking Taiyuan as an example, *according to the researched COVID-19 transmission rules, the prevention and control simulation of COVID-19 has been achieved under the designing rule of the interactive infection process and status transition process between various resident agents.* Multi-scenario simulation experiments are realized under different policy measures of hospital and government. The experimental results show that the multi-agent modeling method is effective in analyzing the spread of COVID-19 and can provide decision support for city epidemic prevention and control.

**Keywords:** new coronavirus transmission; urban epidemic prevention and control; multi-agent modeling; public health safety; virus prevention and control strategy

## 引言

2019 年 12 月中国武汉发现 COVID-19 肺炎病



收稿日期: 2020-06-07 修回日期: 2020-08-16;  
基金项目: 深圳市科技创新项目(JSGG20170413173  
425899), 中国科学院战略性先导科技专项(XDA  
20010000), 山西省自然科学基金(201901D111258);  
作者简介: 潘理虎(1974-), 男, 河南上蔡, 博士, 教  
授, 研究方向为人工智能、软件工程。

例<sup>[1]</sup>。2020 年 3 月, 世界卫生组织(WHO)宣布, 疫情具有全球流行特征, 至 4 月 11 日, 共有 211 个国家和地区出现 COVID-19 肺炎病例, 疫情形势严峻, 欧美国家更是不断恶化, 成为新的疫情大暴发地, 美国确诊病例数量不断攀升<sup>[2]</sup>。

COVID-19 病毒疫情是突发公共卫生危机, 病毒的高传染性严重危害人类生命健康, 并对社会经

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

• 2244 •

济造成巨大威胁<sup>[3-4]</sup>。疫情引发大众大面积心理恐慌, 严重扰乱社会秩序。众多生产生活企业运营受到严重影响, 由于多米诺骨牌效应, 对世界经济造成巨大冲击。高传染性使得感染人数在短期内暴涨, 医护人员和各种物资供给极度紧张。突发性新冠病毒防控已经成为当前维护全球公共卫生安全的重点工作, 因此 COVID-19 病毒传播规律的探索及疫情发展的动态预测是全人类面临的紧要问题<sup>[5]</sup>。

疫情暴发以来, 国内外已有部分学者针对 COVID-19 病毒对疫情发展趋势展开广泛研究。李昊等<sup>[6]</sup>介绍了 GGM(Generalized-Growth Model), GRM(Generalized Richards Model), SIR (Susceptible-Infected-Recovered)等模型及元胞自动机、人工神经网络等常用的动力学模型, 并根据 COVID-19 病毒蔓延现状, 分析了各个模型在疫情仿真模拟中的优劣之处; Munayco 等<sup>[7]</sup>依据 COVID-19 病毒早期传播阶段每日病例新增数量评估了社会疏远干预措施对秘鲁地区的早期病毒传播动态的影响, 并与无措施情况对比得出干预措施减慢了病毒的传播速度; Ricardo 等<sup>[8]</sup>利用空间统计方法, 描述了 COVID-19 病例在空间上的分布, 并确定了病例的重要空间群和不同空间区域的社会经济特征, 分析得出局部空间接触及空间温度是影响病毒传播的重要因素; 陈恩等<sup>[9]</sup>在 SEIR (Susceptible Exposed Infected Removed)模型基础上, 采用 WPF(Windows Presentation Foundation)编程, 以湖北省 COVID-19 病毒传播过程为例, 计算确诊数量、治愈数量、死亡数量的预测结果的误差, 发现了影响感染人数增加的因素。

上述研究中仅提出了 COVID-19 病毒的传播模型以及影响疫情发展的因素, 未考虑健康个体与感染个体的空间距离对疫情的影响。而实际上, 新冠病毒的传播过程不仅是随时间演变的, 而且随个体空间位置的改变而发生变化<sup>[10-11]</sup>, 风险状态到感染状态的转换影响病毒在空间中的传播。此外, 个体具有主动性, 其行为方式对疫情发展也会产生作用, 而且会随环境变化发生适应性改变。如果正常

个体曾与感染者接触, 则该正常人受到感染的概率将增大, 这使得病毒传播问题更加错综复杂<sup>[12-13]</sup>。多智能体仿真方法将人类抽象成智能体, 模拟个体的微观行为, 通过交互作用和个体状态变换模拟 COVID-19 病毒在社会网络上的传播情况, 能够更准确地发现人在防控病毒传播过程中的作用<sup>[14-16]</sup>。

本研究基于多智能体建模技术, 利用 Repast Symphony 平台设计并构建 COVID-19 病毒防控仿真模型, 定义政府智能体、医院智能体、医护人员智能体, 同时定义了健康者、潜伏者、发病者、被隔离者 4 类居民智能体, 依据已发现的 COVID-19 病毒传播机制<sup>[17]</sup>, 制定 4 类居民智能体之间的交互传染与状态转换规则。以山西省太原市疫情发展与防控为例, 针对不同医疗条件、不同初始感染人数和政府发布的各类防控措施进行仿真实验, 测试不同防控策略的效果, 以便为城市病毒防控提供决策支持。

## 1 基于多智能体的 COVID-19 病毒防控仿真模型构建

### 1.1 模型概述

COVID-19 病毒防控模型是一个虚拟仿真系统, 系统中的病毒传播、城市居民的迁移行为决策和疫情防控措施的变化, 具有很高的时空复杂性。模型刻画了政府智能体、医院智能体、医护人员智能体以及健康者、潜伏者、发病者、被隔离者四类居民智能体。其中, 健康者智能体会因其移动需求和病毒感染风险的不同存在不同概率的感染风险; 潜伏者智能体在发病和潜伏期间的移动使得与他们有近距离接触的健康者存在不同的感染风险; 发病者智能体会因为病毒致死概率、医院床位、医护人员数量和医院响应时间影响他是否能够及时住院进行治疗; 被隔离者智能体是否能够成功康复受到病毒致死概率、医院医疗资源和治愈成功率影响。模型中初始感染者数量、医疗资源数量和各类智能体的行为决策是影响病毒传播过程的主要因

素。由此构成一个多因素作用并随时间迭代演化的 COVID-19 病毒传播系统。

## 1.2 智能体定义

### 1.2.1 智能体类型与属性

在 COVID-19 病毒传播过程中,居民是其重要的传播载体和生物宿主<sup>[18]</sup>;政府、医院和医护人员是进行病毒防控的重要行为主体。因此在本研究中重点关注居民、政府、医院和医护人员 4 类现实对象。同时,基于在传染病传播系统和 COVID-19 病毒传播体系中人群种类的划分,本文将居民划分为 4 类具有典型特征的智能体来进行研究。由此,构建的 COVID-19 病毒防控多智能体仿真模型包含政府智能体、医院智能体、医护人员智能体、健康者智能体、潜伏者智能体、发病者智能体和被隔离者智能体等 7 类智能体,每一类智能体都具有与各自角色匹配的属性和行为。

政府智能体的属性主要包括多项政策信息(限制出行、戴口罩条例等);医院智能体的属性主要包括位置、收治响应时间、床位数等;医护人员智能体的属性包括位置、工作状态等;健康者智能体的属性包括位置、个人移动意愿、目标位置、抵达状态等;潜伏者智能体的属性主要包括位置、移动

意愿、目标位置、抵达状态、感染时刻、发病时间等;发病者智能体的属性主要包括位置、核酸检测时间、确诊时刻等;被隔离者智能体的属性包括位置、是否致死、隔离时刻、死亡时刻、治愈所需时间。模型将医疗资源情况进行简化,只包括医院收治响应时间、剩余有效医护人员数量和医院剩余床位数量 3 个参数。

### 1.2.2 智能体行为活动分析

智能体的行为活动是推动模型演化的主要因素。正是因为模型中的智能体遵循一定的规则进行周期性活动,模型的智能体和空间环境才得以实现符合具体仿真内容的动态变化,进而刻画出复杂事件的发展过程<sup>[19-20]</sup>。新型冠状病毒仿真模型中智能体行为的设计是建立在案例研究基础上,并结合已有的仿真数据和相关理论假设最终确立的<sup>[21]</sup>。本文各类行为和适用主体的设计遵循现实情况基本机理,同时在达到仿真模型整体有效性的前提下,不断地进行校正和调节,从而保证了复杂现象的正确刻画。模型中各类智能体根据其在模型中的角色和自身属性具有不同的行为,并且这些行为来源于现实世界,是对现实新冠病毒传播过程的真实反映,各项行为活动的具体描述和适用主体见表 1。

表 1 智能体行为与描述  
Tab. 1 Agent behavior and description

智能体行为	行为描述	适用智能体
发布限制出行/戴口罩条例	为应对疫情传播而采取的防护和应对策略,并将结果作用于 4 类居民智能体	政府智能体
救治医院内的被隔离智能体	与医院内的被隔离者形成医患关系,提供一定的医疗救治措施	医护人员智能体
救治发病者智能体	对发病者智能体进行确诊、收治和隔离管控等医疗救治措施	医院智能体
医护人员/床位资源管理	医院现有剩余医护人员数量和空床位数量信息的计算与发布	医院智能体
空间流动	除被隔离者智能体之外的居民智能体进行具有目的性的空间流动行为	居民智能体
病毒感染行为	在一定概率条件下,发病者智能体与潜伏者智能体通过空间接触感染健康者智能体,使其转换为潜伏智能体	发病者与潜伏者智能体
政策与床位资源感应	实时感知区域内空余床位资源,并依据其数值和自身角色作出相对响应	居民智能体
状态转换行为	在一定外力和时间条件下,智能体发生性质上的状态转换,例如健康者智能体被感染转换为潜伏者智能体	居民智能体
政策调整	政府发布新政策覆盖原有政策,并作用环境	政府智能体

政府智能体的活动包括发布限制出行和戴口罩出行的条例; 医院智能体的活动包括对医护人员资源管理, 床位资源安排等; 医护人员智能体的活动包括对发病智能体进行收治、医护人员资源反馈; 健康者智能体的活动包括移动、响应政府号召; 潜伏者智能体的活动包括流动、响应政府号召、传播病毒、发病; 发病者智能体的活动包括接受核酸检测、寻求医院床位进行治疗; 被隔离者智能体的活动包括在家中隔离、在医院进行治疗、康复出院、病死。同时各类智能体的具体行为也按照现实主体的行为特点进行设定, 以保证模型科学性与可信性。

### 1.3 智能体行为规则

#### 1.3.1 居民智能体流动行为规则

居民智能体是否流动与居民智能体的状态和流动意愿值有关。本模型中, 被隔离者智能体无法流动, 其余 3 类居民智能体依据其流动意愿在模型空间区域内进行目的性移动。目前行人运动模型主要分为宏观模型和微观模型。其中宏观运动模型将行人整体作为类流体进行分析; 而微观模型可以考虑每个行人的行为特性, 与宏观模型相比, 可以考虑更多的细节和关系, 因此对行人运动过程的模拟更加贴近实际情况<sup>[22-23]</sup>。考虑到本模型中智能体之间存在差异, 结合模型采用栅格空间作为智能体的运动环境, 本文采用微观行人运动模型中的元胞自动机模型来描述模型中各类智能体的空间流动。将栅格中每一个格点称为一个细胞或元胞。行人依据邻域内的元胞情况, 并依照一定的概率规则来选择自己的移动方向。根据中心极限定理, 如果将大量由具有不同分布的随机变量共同作用从而得到的新变量将最终具有正态分布<sup>[24]</sup>。由于模型中各居民智能体个体自身的多种随机因素共同作用于其目标位置点的选择, 故智能体移动的目标位置点设置为随机生成的符合正态分布的目标点。居民智能体当前位置为  $P(x_1, y_1)$ , 初次流动将自身移动目标设置为随机生成的符合正态分布的目标点

$T(x_2, y_2)$ , 且  $T$  分布于以  $P$  点为圆心的一定范围内。在每个仿真时间步中, 居民智能体结合个人流动意愿值向各自目标逐渐靠近, 直到经过足够仿真步数到达目标点, 此时居民智能体依据相同的随机正态分布产生下一目标点, 如此迭代。个人流动意愿值为流动意向平均值与随机流动意向的和, 如公式(1)所示。

$$X = \sigma \times StdX + u \quad (1)$$

式中: 居民流动意向  $X$  服从均值为  $u$ , 方差为  $\sigma^2$  的正态分布,  $\sigma$  影响分布形态影响整体人群流动意愿分布, 其值越大则表明个体之间流动意愿差异越大, 在公式(1)中使用其来计算随机流动意向;  $u$  值决定正态分布的中轴, 在此公式中为流动意向平均值; 式中  $StdX$  为服从高斯分布的随机数; 具体计算方式如公式(2)所示。

$$StdX = (X - u) / \sigma \quad (2)$$

模型中, 标准化个人流动意愿  $X$  后, 其值若大于 0, 则智能体移动, 反之不移动。智能体是否到达目标点根据初始点与目标点间的距离判断, 假设  $D$  是  $P$  到  $T$  之间的距离,  $D = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$ , 若  $D < 1$ , 则认为  $P$  已经到达  $T$ 。

#### 1.3.2 居民智能体状态转换规则

结合已发现的 COVID-19 病毒传播规律, 模型制定了各类居民在新冠病毒传播过程中的状态转换规则。模型初始时, 发病者智能体、健康者智能体、潜伏者智能体等 3 种居民智能体, 经过一定时间条件下的人员接触和病毒传播, 可能出现状态转变, 产生新的状态类型, 如图 1 所示。

模型可能出现的居民状态共分为 7 种, 分别为 S1 健康, S2 潜伏, S3 发病, S4 确诊, S5 被隔离, S6 治愈, S7 死亡, 且居民从一个状态转换为另一个状态需经过一定的条件。首先模型中处于病毒潜伏状态和发病状态居民可感染健康居民, 从而使其成为病毒潜伏状态, 之后或转换为发病、确诊、自愈等状态; 发病和确诊状态的居民待医院采取隔离和救治措施后开始向自愈、隔离、死亡或治愈状态

转换。确诊状态居民能否接受治疗与隔离存在以下 3 种情况：医院医疗资源充足，该居民被治疗成功，逐渐恢复正常，回到健康状态；医院有医疗资源充足，但是治疗失败，该居民死亡；医院医疗资源紧缺，因此该病人处于自我隔离状态，若隔离期间等到被提供医疗资源，则可成功被医院收治，减少其死亡概率。

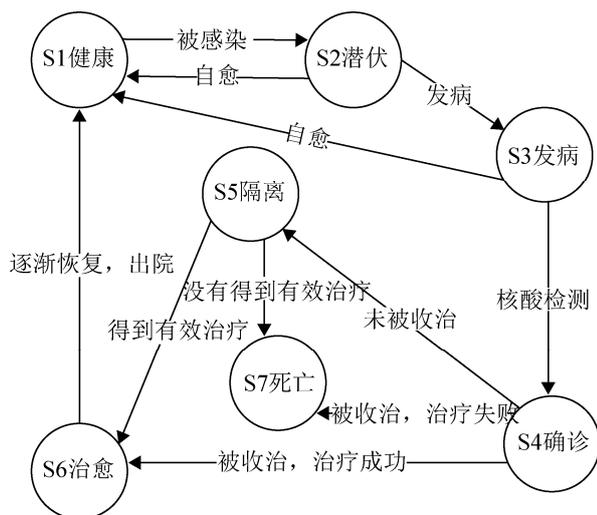


图 1 居民 Agent 状态转换图

Fig. 1 Resident Agent state transition diagram

### 1.3.3 智能体间的接触传播规则

接触传播是新冠病毒的主要传播路径，居民主要通过近距离接触传染源而引发感染<sup>[25]</sup>。因此，此模型中考虑居民智能体空间安全距离，若健康者智能体与发病者智能体和潜伏者智能体之间的距离小于安全距离时，健康者智能体有一定概率被感染，状态由健康变为潜伏。模型设定的感染风险的区域  $SD$  如公式(3)所示。

$$SD = Area(cell_i + cell_{i\pm 1}) \quad (3)$$

式中： $cell_i$  为居民 Agent 当前所在栅格(栅格为模型空间基本单位，大小为  $1 \text{ m}^2$  的方形区域)； $cell_{i\pm 1}$  为附近紧邻的 8 个栅格； $Area(x)$  为摩尔领域(摩尔领域指当前栅格紧邻的 8 个栅格所在的空间区域)。

每个仿真时间步内，发病者智能体和潜伏者智能体通过空间移动会接触在其感染风险区域内的所有健康者智能体，被接触的健康者智能体都有几

率被感染。模型中以概率随机值控制感染概率，当概率随机值超过传播率参数，则被接触的健康者智能体发生感染。

### 1.3.4 医院智能体收治病人行为规则

医院智能体可结合当前医护人员智能体数量以及床位资源对发病者智能体进行收治、管控与治疗。模型中医院智能体可实时获取发病者智能体信息，当感知到发病病例出现时，可经过一定的响应时间实现发病者智能体的收治工作，从而将其转换为被隔离者智能体。但可能存在种种原因，如医护人员不足、床位资源紧缺等，医院会拒收病人。模型中每天医院的收治响应时间根据当天医疗资源水平和一般响应时间综合确定，具体计算如公式(4)所示。

$$Response_i = \begin{cases} \infty & Bed_{empty} \leq 0 \text{ 或 } R < R_b \\ Round[Random(2,4)] & Bed_{empty} > 0 \text{ 且 } R \geq R_b \end{cases} \quad (4)$$

式中： $Response_i$  为医院响应时间； $Round(x)$  为对参数进行四舍五入取整， $Random(2,4)$  为求得 2 和 4 之间的随机数，取整后即 2~3 天(正常收治时间，由太原市医疗水平推测)； $Bed_{empty}$  为空床数量； $R$  为医院当前医患比，根据医院当前已收治的发病智能体数量和医生、护士智能体数量确定，计算方式如公式(5)所示。 $R_b$  为基本配比，即发病智能体所需的最低医护人员配置。

$$R = Num_{DoctorAndNurse} / Num_{patient} \quad (5)$$

式中： $Num_{DoctorAndNurse}$  为工作状态的医护人员智能体数量； $Num_{patient}$  为医院当前已收治的发病智能体数量。据《三级综合医院评审标准实施细则》，按现三甲医院的配置，一个患者床位需配备 0.6 个医护人员，病情相对平稳的情况下至少也需配备 0.4 个医护人员，因此模型中设定医患基本配比  $R_b$  为 0.4。模型中的医患比  $R$  可衡量医院医护人员的工作负荷，当其值大于 0.6 时，医护人员充足，可完全满足医院智能体的正常服务；当其值介于 0.4~0.6 之间时，医护人员超负荷工作，但仍可满足医院智能体的正常服务；而当其值  $\leq 0.4$  时，医

人员严重不足,已不能提供发病智能体的收治服务。

当医院因床位数量不足或医患配比小于基本配比  $R_b$  时,医院智能体服务失效,发病者智能体的收治响应时间为无穷大,即发病智能体被拒收;反之,发病者智能体的收治响应时间为 2~3 天。该值的设置是通过现实案例分析和查阅有关 COVID-19 病毒的相关报告得到的。通过分析了解到发病者的收治需经过两个步骤,分别为采用核酸检测进行确诊,以及履行当地定点医院专业的运输、管控及住院流程。据此,模型为保证仿真的真实性与合理性,对发病智能体的收治时间进行了合理考虑,在医疗资源条件满足时,发病智能体的收治时间为 2~3 天。

模型中被发现的发病者智能体经过响应时间(计算得到的收治响应天数)后在第  $i$  天被医院智能体收治,并占有床位和医疗资源。医院智能体成功收治病人后,空余床位、剩余最大医护人员效力实时更新,更新方式分别如公式(6)~(7)所示。

$$Bed_{empty\_i} = Bed_{empty\_i-1} - Num_{patient\_i} \quad (6)$$

$$Effect_i = Effect_{i-1} - 0.4 Num_{patient\_i} \quad (7)$$

式中:  $Bed_{empty\_i-1}$  为第  $i-1$  天的空床数量;  $Effect_{i-1}$  为第  $i-1$  天的剩余医护人员效力,其初始值为医护

人员智能体数量;  $Num_{patient\_i}$  为第  $i$  天收治发病智能体数量。

发病智能体被医院收治后转换为被隔离者智能体,之后医院智能体对被隔离者智能体实施治疗,治愈周期为 3~6 周。治愈后的居民转换为健康者智能体,并遵循健康者智能体的行为规则进行活动与交互。

### 1.3.5 政府防控措施发布行为规则

政府智能体在模型中充当政策发布者角色,可实现限制居民活动以降低接触率、强制要求居民佩戴口罩等疫情防控措施。政府智能体发布相应政策和信息后,各类居民智能体可实时接收并结合自身状态对接受到的信息进行响应。同时,政府政策信息和相关工作自发布之后长期有效,直到政府发布新的政策与工作安排才会被覆盖。

## 2 基于多智能体的新型冠状病毒传播仿真

### 2.1 仿真系统的运行流程

COVID-19 病毒防控仿真模型以天为时间单位进行计算与更新,如图 2 所示。

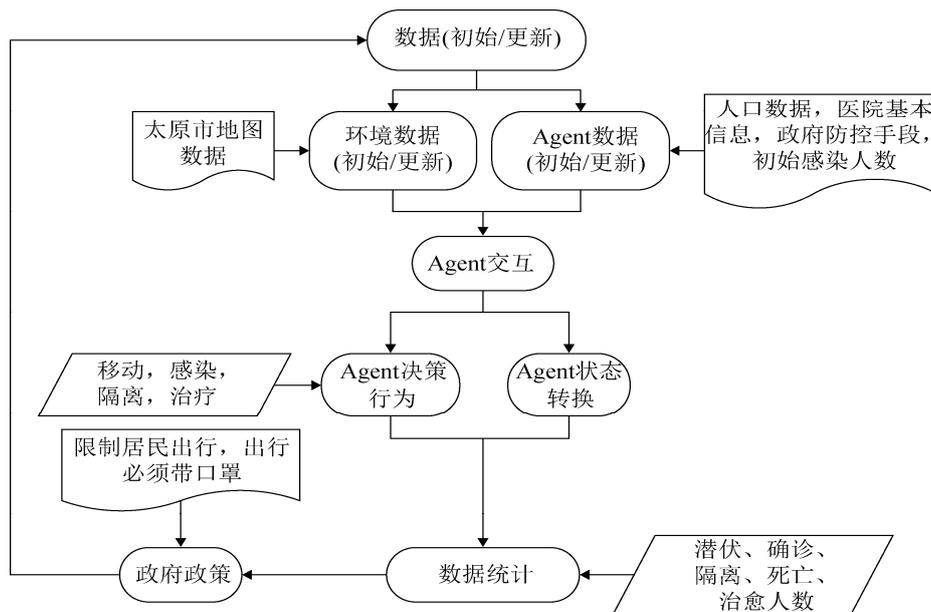


图 2 模型运行过程

Fig. 2 Model running process

首先,环境数据的初始化主要包括太原市地图数据导入,环境数据更新时智能体数量、状态数据更新并进行可视化处理;智能体数据初始化包括政府、医院、健康者、潜伏者、发病者、被隔离者的初始化,智能体数据更新时考虑每天的感染人数、发病人数、确诊人数、隔离人数;然后模型中的智能体按照行为规则进行交互;接着根据交互结果智能体进行行为决策并同时按照状态转换规则完成自身的状态转换;最后进行数据统计和政府政策策略变化的设置。数据统计包括潜伏人数、确诊人数、隔离人数、死亡人数、治愈人数的统计和可视化显示;政府政策策略包括限制居民出行,加强个人防护,投入医疗救治手段;以天为周期循环往复。

## 2.2 模型框架

新型冠状病毒防控模型在结构上分为 3 个阶段,即准备、运行和数据管理,如图 3 所示。仿真准备阶段为模型提供可操作的数据,模型采用这些

数据对模型中的智能体、空间环境以及各要素间的交互信息进行配置。仿真运行阶段是模型设计的核心,展现各类居民智能体之间通过空间环境交互实现病毒的传播与自身状态的转换演化过程。同时在此过程中反映政府智能体和医院智能体决策行为对病毒防控的作用。本阶段 4 类居民智能体、政府智能体和医院智能体通过信息交互实现数据交换,并根据自身获取的信息进行对应的行为活动与状态调整。模块控制部分主要负责实现模型各组成部分的有序运转。智能体调度主要负责为相应时段内运行的智能体分配资源;状态控制主要负责模型中各要素状态变换,如智能体属性的改变,各环境参数的改变;时钟控制主要负责按照时间顺序对系统进行有序控制,如仿真步数的变更;环境控制主要负责模型中环境的导入、变化和导出。4 种控制机制共同保证了模型正常运行,且实现了模型运行的数据结果的提取、存储与统计展示。

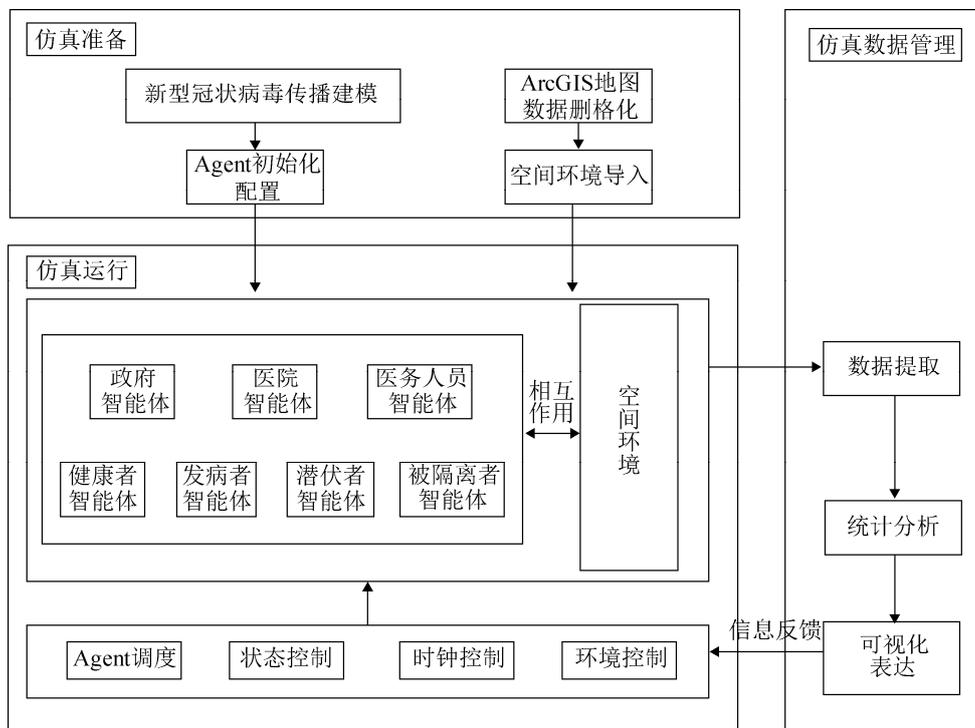


图 3 模型架构

Fig. 3 Model architecture

## 2.3 仿真实现

本研究以山西省太原市 COVID-19 病毒传播与防控为例, 探求不同人员流动、防护措施和医疗救治措施的场景下病毒的传播和防治情况。模型中设置 3 种防控策略, 分别是政府限制居民出行、加强个人防护、投入医疗救治手段。通过一段时间的运行, 比较病毒发展趋势, 从而分析疫情防控的主要影响因素和效果。COVID-19 病毒防控多智能体模型对山西省太原市新型冠状病毒传播情况进行模拟, 初始人口分布按照随机正态分布进行生成, 以太原市第四人民医院的床位数量作为模型的医疗资源总量。模型可在每周周期结束时实现各类智能体的数量计算与统计, 并输出结果。依据太原市真实病毒初始感染人数和传播机制来进行模拟, 模型实例中的主要参数如表 2 所示。

模型基于 Repast Symphony 仿真平台研发而成, 应用 ArcGIS 将数据转为二维平面图作为智能体的活动空间, 表现为由若干个网格组成的空间系统, 承载智能体的行为活动<sup>[26-27]</sup>。模型运行界面如图 4 所示。界面中的地图部分是病毒传播仿真界面, 不同颜色的圆点代表不同居民智能体, 绿色为

健康者智能体、黄色为潜伏者智能体、红色为发病者智能体、灰色为隔离智能体, 小房子为医院; 图中 **BebNum** 是在模型运行周期内医院床位的变化统计表; **HumanNum** 是病毒传播过程中处于不同状态居民的数量变化情况; **AgentCount** 记录了 4 类智能体的实时变化, 以折线统计图的形式展示。

## 3 仿真实验与结果分析

### 3.1 仿真场景

针对完全无措施、政府限制出行、加强个人防护、投入医疗救治手段, 综合防控及初始感染人数增多等 6 种场景, 对各类居民智能体的发展变化情况进行了仿真模拟, 以此探究和预测疫情发展趋势和各项措施的防控效果。同时, 利用模型模拟了在不同初始感染人数情况下, 疫情传播与防控的发展趋势, 可为可能发生的疫情场景进行预测与分析。

模型输出数据包括潜伏状态、确诊状态、隔离状态、死亡状态、治愈状态的人数实时统计数量。其中, 潜伏状态人数即潜伏者智能体个数, 确诊状态人数即发病者智能体个数, 隔离状态人数即被隔离者智能体个数。

表 2 COVID-19 病毒防控仿真模型实例中的主要参数

Tab. 2 Main parameters in the example of COVID-19 virus prevention and control simulation model

参数名称	初始值来源	说明
初始感染数量	山西省卫健委 2020 年 2 月 17 日通报	19 人
传播率	Report of the WHO-China Joint Mission on Coronavirus Disease 2019(COVID-19)	1%~10%
潜伏时间	Report of the WHO-China Joint Mission on Coronavirus Disease 2019(COVID-19)	平均 5~6 天, 范围 1~14 天
医院收治响应时间	太原市第四人民医院	2~3 天
医院床位	太原市第四人民医院	440 个
医护人员数量	太原市第四人民医院	118 人
城市总人口数量	太原市统计年鉴	442.14 万人
病死率	截止至 6 月 4 日的全国病死率	5.94%
死亡时间均值	Report of the WHO-China Joint Mission on Coronavirus Disease 2019(COVID-19)	2~8 周
治愈时间均值	Report of the WHO-China Joint Mission on Coronavirus Disease 2019(COVID-19)	轻症约为两周, 重症和危重症约为 3~6 周
戴口罩减少感染率	Physical distancing, face masks, and eye protection to prevent person-to-person transmission of SARS-CoV-2 and COVID-19: a systematic review and meta-analysis	80%

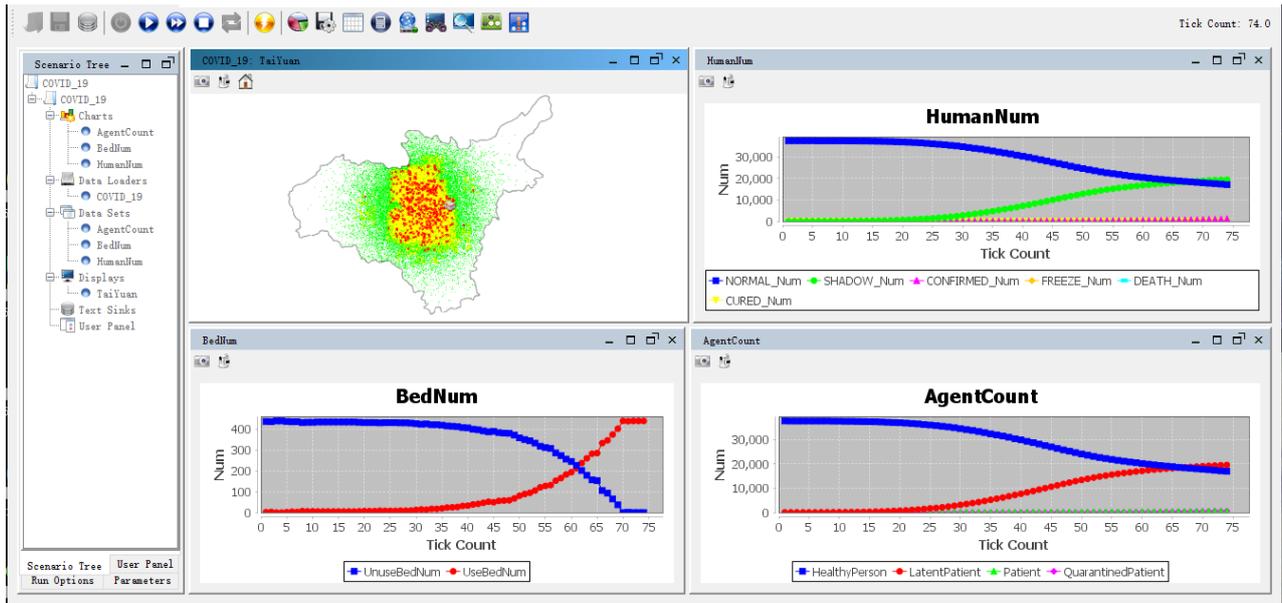


图 4 模型界面

Fig. 4 Model interface

### 3.2 仿真结果分析

#### (1) 完全无措施场景

按照以往居民活动方式进行设定,所有居民智能体流动无限制且无防护措施,政府和医院智能体未采取任何措施。即在此场景实验中,程序设定个人流动意愿值为 0.99(人群流动最快速率),接触传播率为 1%~10%,医院救治床位数为 0。在此情景下,各类居民智能体的数量变化结果如图 5 所示。

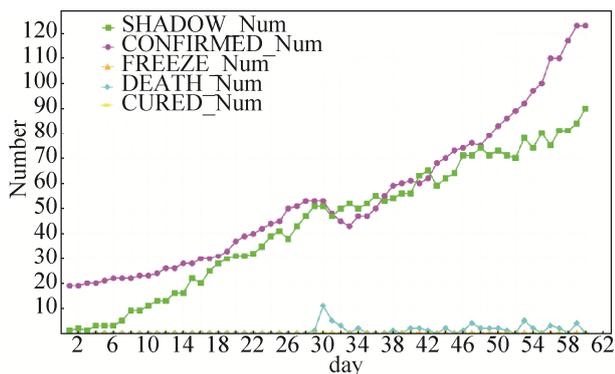


图 5 完全无措施场景

Fig. 5 Completely no action scenario

由于政府和医院未采取任何防控和应对措施,发患者智能体与潜伏者智能体的数量呈增长趋势,且这 2 类居民不能得到管控和救治,从而在此场景

下被隔离者智能体和治愈状态的居民数量为 0。在此情景下,因新冠病毒致病期长且致死率低从而在 28 天左右出现死亡病例,并在之后每日新增维持在一定水平,长期时间内无法改善。以上仿真结果表明,在太原市政府未出台防控政策的情况下,居民活动未受到限制,从而增大了居民感染几率,并无法实现隔离及救治,从而使疫情难以控制。这种场景非常类似欧美部分国家群体免疫措施,结果与也同部分国家的疫情失控状况一致。

#### (2) 政府限制出行场景

设定政府智能体限制居民活动从而减少居民接触几率。在此场景中在无措施场景的基础上设定个人流动意愿值为-0.99(人群流动最慢速率),从而降低居民智能体的出行意愿,其余参数设定与场景一一致。在此情景下,各类居民智能体的数量变化结果如图 6 所示。

由于政府开始执行人员管控措施,此场景较上一场景发患者智能体和潜伏者智能体增长幅度明显降低,并在第 30 天左右出现小幅拐点。拐点时间与模型设定的死亡和治愈时间相近,因而推断出该拐点与上述参数存在一定联系。之后各类智能体数量保持平稳,无较大波动。以上仿真结果表明太

原市政府出台限制居民出行后, 阻断了传染源, 居民感染几率明显降低。这种结果与欧美部分国家限制人群聚集和出行后疫情得到缓解的状况一致。

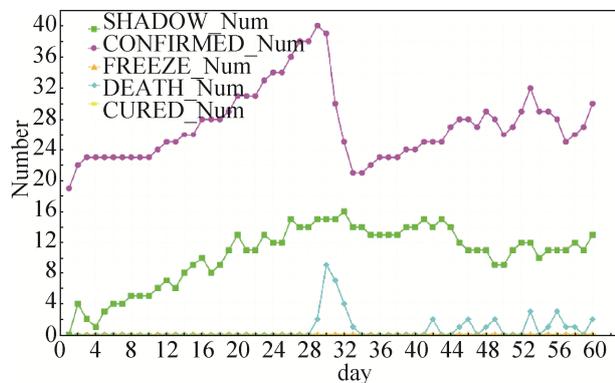


图 6 政府限制出行场景

Fig. 6 Government restricted travel scenario

### (3) 加强个人防护场景

设定政府智能体规定各类居民需佩戴口罩进行个人防护从而降低病毒传播率。在此场景中无措施场景的基础上将接触传播率更改为 0.2%~2%, 其余参数设定与场景一一致。在此情景下, 各类居民智能体的数量变化结果如图 7 所示。

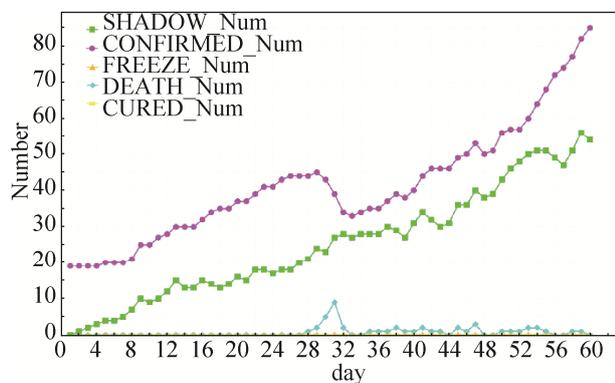


图 7 加强个人防护场景

Fig. 7 Strengthen personal protection scenario

由于佩戴口罩减少了 80% 的接触传染率, 从而在此场景下发病者智能体和潜伏者智能体的数量增速变缓, 其增幅相比于场景一小范围减少, 说明佩戴口罩虽然能大幅降低接触传播率, 但发病者智能体和潜伏者智能体的随意活动仍然造成了病毒的传播。在此场景中, 死亡病例随发病者智能体进

行相应变化, 被隔离者智能体和治愈状态的居民也同场景一因无医疗救治与隔离管控措施从而数量为 0。此实验表明, 加强个人防护对于疫情传播阻断具有一定的成效, 但对于整体的疫情防控工作还远远不够。

### (4) 投入医疗救治手段场景

设定医院智能体为发病者智能体提供一定数量的床位和专业治疗手段, 发病者智能体能够及时得到隔离管控和救治, 但个人防护措施和人员流动限制仍缺乏。即在此场景实验中, 个人流动意愿值为 0.99(人群流动最快速率), 接触传播率为 1%~10%, 医院救治床位数为 440。在此情景下, 各类居民智能体的数量变化结果如图 8 所示。医院及时收治发病者智能体明显控制了发病者智能体的增长速度, 仿真前 30 天日发病者智能体的数量维持在 18~30 之间。医院的隔离措施也使绝大多数的发病者智能体转换成被隔离者智能体, 从而很好地降低了发病者智能体的出行活动, 从而感染几率大大降低。仿真 30 天之后, 达到第一个治愈高峰期, 治愈病例出现并保持平稳发展, 同时发病者智能体日趋减少。通过以上仿真结果可知, 此场景下发病者基本都能够得到救治与隔离, 疫情状况总体趋于好转, 这表明目前太原医院床位数充足, 当前疫情仍在可控阶段。

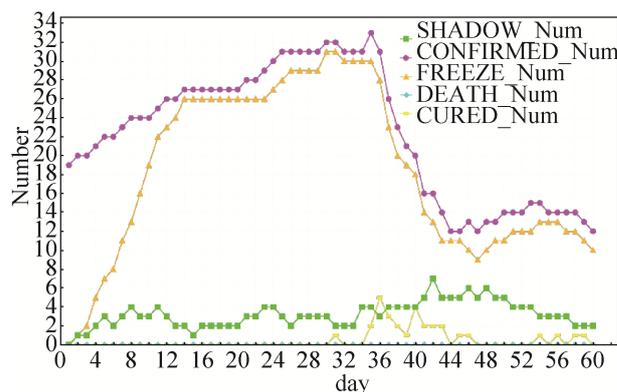


图 8 投入医疗救治手段场景

Fig. 8 Medical treatment scenario

### (5) 综合防控场景

综合考虑以上提到的所有防控措施和医疗救

治, 设定个人流动意愿值为-0.99(人群流动最慢速率), 接触传播率为 0.2%~2%, 医院救治床位数为 440。在此情景下, 各类居民智能体的数量变化结果如图 9 所示。随着医院、政府、居民都开始重视疫情防控工作, 发病者智能体和被隔离者智能体的数量得到了明显的控制, 随着发病者智能体的减少, 治愈居民的数量不断增加, 被隔离者智能体数量开始减少并趋于 0。潜伏者智能体的数量在第 26 天出现了明显的下降, 死亡居民的数量则基本为 0。以上仿真结果表明, 多种措施的结合有助于疫情防控。由于疫情传播影响因素复杂多样, 仅凭单一措施难以有效控制疫情蔓延, 因此多方面、多手段防控措施势在必行。

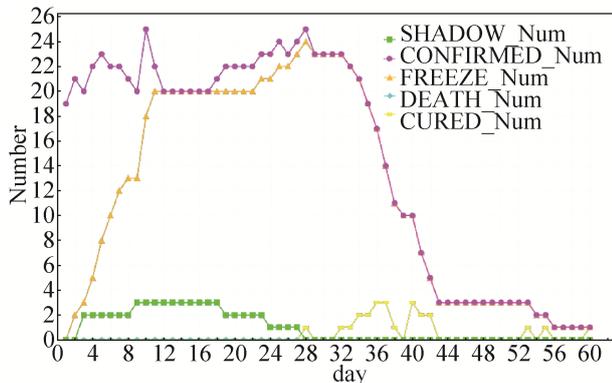


图 9 综合防控场景

Fig. 9 Comprehensive prevention and control scenario

#### (6) 初始感染人数增多场景

通过以上情景分析可知, 在实际情况下太原的疫情发展形势平稳可控, 且在综合防控措施下, 病例增加较少, 医疗资源充足, 控制时间缩短, 基本实现了疫情的有效控制。因此, 现为探究在相同防控措施和医疗资源条件下, 初始感染人数增多对疫情防控造成的影响设计了模拟实验。通过调节多种初始感染人数, 观察在不同数量病例下疫情的发展趋势及医疗资源使用情况。

实验发现, 当初感染人数为 100 人, 200 人, 300 人时, 各类居民智能体的数量变化结果分别如图 10~12 所示。当初感染人数为 100 人时, 各项防控措施效果明显, 发病者智能体的数量平缓上

升, 峰值达到 115 左右。但通过程序运行发现, 此情景中, 床位数充足, 医患比始终保持大于 0.6, 这表明程序中设定的医疗水平能够满足当前需求, 可保证发病智能体的收治隔离工作进行顺利。

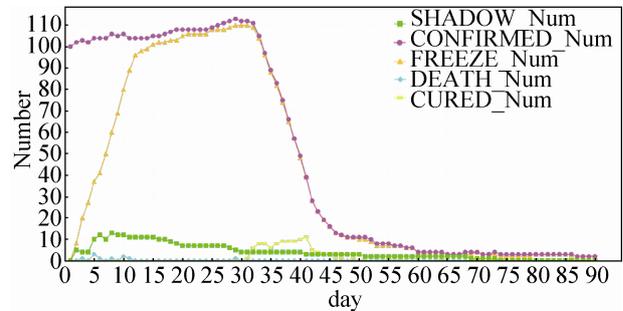


图 10 初始感染人数 100 人场景

Fig. 10 Scenario of the initial number of infections is 100

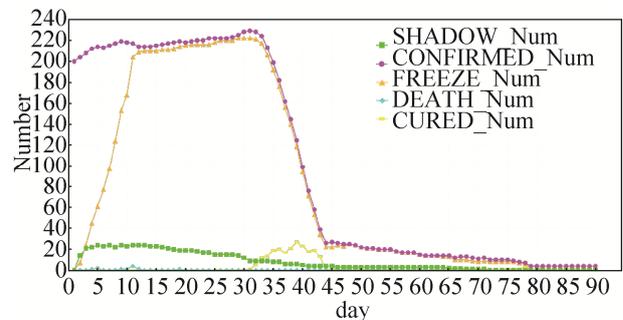


图 11 初始感染人数 200 人场景

Fig. 11 Scenario of the initial number of infections is 200

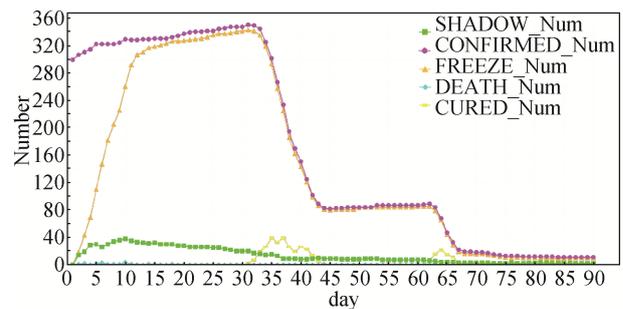


图 12 初始感染人数 300 人场景

Fig. 12 Scenario of the initial number of infections is 300

当初感染人数为 200 时, 发病智能体较第一种情况增多, 峰值达到了 230 左右, 其余发展趋势基本相同。但此情景控制时间更长, 初始感染人数为 100 时, 疫情于 70 天左右得到控制, 而此情景下, 疫情于 80 天才达到相同效果。通过程序运行可知, 在模型运行初期到 35 天, 虽然床位数仍有

剩余, 但医患比始终保持在 0.4~0.6, 35 天之后, 医患比增大至 0.6 以上, 后期接近于 1。这表明此情况下, 当感染病例在 200 以上时, 医护人员能满足收治病人需求, 但其工作负荷已超过正常水平。

当初始感染人数为 300 时, 发展趋势前期基本与前两种情况相同, 但在 45~65 天阶段内的趋势不同, 此种情况发病智能体和被隔离者智能体更多, 且趋势保持平稳, 并未下降。通过医患比输出结果可知, 此情景前期该值为 0.4, 即达到程序设定临界值, 发生发病智能体被拒收的情况。因此, 医疗资源已不满足当前需求, 部分发病智能体只能等待被隔离者智能体治愈出院从而释放出空余医疗资源。45~65 天内出现的仿真结果即表明了之前被拒收的发病智能体重新住院医治的情况。此情景的仿真结果表明医疗资源的不足降低了疫情的控制效果与时效。

此实验表明初始感染人数对疫情爆发的影响很大, 增加了防控难度, 健康智能体更容易与感染者接触, 新增感染人数明显变多, 控制难度变大, 控制时间变长。同时此实验可模拟不同感染人数情景下医疗资源的利用情况, 可为医疗资源是否充足实现提前预测, 从而事先对医疗资源进行合理的安排部署。模型中使用的数据可能权威性不足, 其床位数、医护人员数量的设定可根据具体情况进行相应调整, 从而得到符合实际的仿真结果, 从而切实为疫情防控中的医疗资源安排工作提供决策支持。

## 4 结论

本文以 2019 年 COVID-19 病毒传播与防控为目标构建了基于多智能体的 COVID-19 病毒防控仿真模型。利用该模型模拟病毒传播体系中健康者、潜伏者、发病者和被隔离者根据当地医院的医疗资源水平和政府的防止措施产生的适应性行为。通过 7 类智能体的行为变化和结果分析病毒蔓延趋势的变化和疫情防控中的关键因素。由模拟结果可知, 当初始感染人数较少的情况下, 只要太原市城市管理部门在疫情初期能及时做出防控部署,

严格限制人们出行, 要求居民佩戴口罩, 并及时安排定点医院对病人进行收治工作, 就可以极大地降低新冠病毒传播所带来的危害。不同场景对比结果表明疫情在有效管控下 60 天后得以基本控制, 在这 3 种措施中, 限制居民出行和安排定点医院为病人提供医疗救援两种措施, 对疫情防控具有明显作用。当初始感染人数超出 300 人时, 不仅需要城市管理部门对疫情的及时防控, 还需要对医疗资源的提升, 防止由于医疗资源的不足而影响疫情的控制效果与时效。在未来的研究中, 病毒防控时如何有效地协调各项防控措施是进一步研究的主要内容。模型尚需在人群细分、地域细分、跨区域流动、环境因素、规模扩展上进一步完善, 以便更精确地预测城市疫情发展趋势, 为城市卫生安全提供更有效的决策支持。

## 参考文献:

- [1] 唐三一, 肖燕妮, 彭志行, 等. 新型冠状病毒肺炎疫情影响建模、数据融合与防控策略分析[J]. 中华流行病学杂志, 2020, 41(4): 480-484.  
Tang Sanyi, Xiao Yanni, Peng Zhixing, et al. Prediction Modeling, Data Fusion and Prevention and Control Strategy Analysis of New Coronavirus Pneumonia[J]. Chinese Journal of Epidemiology, 2020, 41(4): 480-484.
- [2] Spiteri G, Fielding J, Diercke M, et al. First Cases of Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) in the WHO European Region, 24 January to 21 February 2020[J]. Eurosurveillance (S1560-7917), 2020, 25(9): 1-6.
- [3] Bonaccorsi G, Pierri F, Cinelli M, et al. Evidence of Economic Segregation from Mobility Lockdown During COVID-19 Epidemic[J]. SSRN Electronic Journal (S1556-5068), 2020. DOI:10.2139/ssrn.3573609
- [4] 文军. 直面新冠肺炎: 风险社会的社区治理及其疫情防控[J]. 杭州师范大学学报(社会科学版), 2020, 42(2): 3-11.  
Wen Jun. Facing New Coronary Pneumonia: Community Governance in Risk Society and Prevention and Control of Epidemic Situation[J]. Journal of Hangzhou Normal University(Social Science Edition), 2020, 42(2): 3-11.
- [5] Alzahrani S I, Aljamaan I A, Al-Fakih E A. Forecasting the Spread of the COVID-19 Pandemic in Saudi Arabia Using ARIMA Prediction Model Under Current Public Health Interventions[J]. Journal of Infection and Public

- Health (S1876-0341), 2020, 13(7): 914-919.
- [6] 李昊, 段德光, 陶学强, 等. 传染病动力学模型及其在新型冠状病毒肺炎疫情仿真预测中的应用综述[J]. 医疗卫生装备, 2020, 41(3): 7-12.
- Li Hao, Duan Deguang, Tao Xueqiang, et al. Infectious Disease Dynamic Model and Its Application in the Simulation Prediction of New Coronavirus Pneumonia Epidemic Situation[J]. Medical and Health Equipment, 2020, 41(3): 7-12.
- [7] César V Munayco, Tariq A, Rothenberg R, et al. Early Transmission Dynamics of COVID-19 in a Southern Hemisphere Setting: Lima-Peru: February 29th-March 30th, 2020[J]. Infectious Disease Modelling (S2468-0427), 2020, 5(5): 338-345.
- [8] Ramírez-Aldana R, Gomez-Verjan J, Bello-Chavolla O, et al. Spatial Analysis of COVID-19 Spread in Iran: Insights Into Geographical and Structural Transmission Determinants at a Province level[J]. medRxiv, 2020, DOI: 10.1101/2020.04.19.20071605.
- [9] 陈恩, 段德光, 李昊, 等. 一种基于 WPF 方法的 SEIR 传染病动力学模型仿真研究[J]. 医疗卫生装备, 2020, 41(3): 1-6.
- Chen En, Duan Deguang, Li Hao, et al. A Simulation Study of SEIR Epidemic Dynamic Model Based on WPF Method[J]. Medical and Health Equipment, 2020, 41(3): 1-6
- [10] Grange J M L, Dickinson S J, Davis J R J. Capacity Building During COVID-19: Utilising South Africa's Underutilised International Medical Graduates[J]. South African Medical Journal (S0256-9574), 2020, 110(5). DOI:10.7196/SAMJ.2020.v110i5.14767.
- [11] 刘涛, 黎夏, 刘萌伟. 传染病时空传播的多智能体仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(18): 5874-5877.
- Liu Tao, Li Xia, Liu Mengwei. Multi-agent Simulation Research on the Spatiotemporal Propagation of Infectious Diseases[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(18): 5874-5877.
- [12] Klein I, Levy N, Ben-Elia E. An Agent-based Model of the Emergence of Cooperation and a Fair and Stable System Optimum Using ATIS on a Simple Road Network[J]. Transportation Research Part C Emerging Technologies (S0968-090X), 2018, 86(1): 183-201.
- [13] Rubio-Pérez I, Badía J M, Mora-Rillo M, et al. COVID-19: Key Concepts for the Surgeon[J]. Cirugía Española (English Edition) (S0009-739X), 2020, 98(6): 310-319.
- [14] 李锋, 魏莹. 时序网络视角下网络舆情的演化模型研究[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(3): 394-403.
- Li Feng, Wei Ying. Research on the Evolution Model of Network Public Opinion from the Perspective of Time Series Network[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(3): 394-403.
- [15] Farid A M. Multi-Agent System Design Principles for Resilient Coordination & Control of Future Power Systems[J]. Intelligent Industrial Systems (S2363-6912), 2015, 1(3): 255-269.
- [16] 潘理虎, 李晓文, 秦世鹏, 等. 城市安全宜居度变化多智能体仿真模型[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(7): 1321-1333.
- Pan Lihu, Li Xiaowen, Qin Shipeng, et al. Multi-agent Simulation Model of Changes in Urban Safety Livability[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(7): 1321-1333.
- [17] Derek K Chu, Elie A Akl, Stephanie Duda, et al. Physical Distancing, Face Masks, and Eye Protection to Prevent Person-to-person Transmission of SARS-CoV-2 and COVID-19: a Systematic Review and Meta-analysis [J]. The Lancet (S0140-6736), DOI:10.1016/S0140-6736(20)31142-9.
- [18] Zhai P, Ding Y B, Wu X, et al. The Epidemiology, Diagnosis and Treatment of COVID-19[J]. International Journal of Antimicrobial Agents (S0924-8579), 2020, 55(5): 2-13.
- [19] Li Z Q, Yang H, Zhang K P, et al. Distributed Model Predictive Control Based on Multi-agent Model for Electric Multiple Units [J]. Acta Automatica Sinica (S0254-4156), 2014, 40(11): 2626-2631.
- [20] 谷润平, 贾旭颖, 赵向领, 等. 民航货机装载优化准确建模仿真研究[J]. 计算机仿真, 2019, 36(3): 20-26.
- Gu Runping, Jia Xuying, Zhao Xiangling, et al. Research on Accurate Modeling and Simulation of Civil Aviation Cargo Aircraft Loading Optimization[J]. Computer Simulation, 2019, 36(3): 20-26.
- [21] Li C J, Liu G P. Data-driven Consensus for Non-linear Networked multi-agent Systems with Switching Topology and Time-varying Delays[J]. IET (S1751-8628), 2018, 12(12): 1773-1779.
- [22] 方峻. 基于元胞自动机的行人微观仿真模型研究与应用[D]. 北京: 清华大学, 2012.
- Fang Jun. Research on Theory and Application of Micro-simulation Model of Pedestrian Based on Cellular Automata [D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.
- [23] 郭谨一, 刘爽, 陈绍宽, 等. 行人运动仿真研究综述[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(9): 2237-2242.

- Guo Jinyi, Liu Shuang, Chen Shaokuan, et al. Review of Pedestrian Motion Simulation Research[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(9): 2237-2242.
- [24] Mkolesia A. On the Estimation of a Univariate Gaussian Distribution: A Comparative Approach[J]. Open Journal of Statistics (S2161-718X), 2015, 5(5): 445-454.
- [25] Melika L, Michael R H, Nima R. COVID-19: Transmission, Prevention, and Potential Therapeutic Opportunities[J]. Clinica Chimica Acta(S0009-8981), 2020, 508(5): 254-266.
- [26] North M J, Collier N T, Ozik J, et al. Complex Adaptive Systems Modeling with Repast Symphony[J]. Complex Adaptive Systems Modeling (S2194-3206), 2013, 1(1): 1-26.
- [27] Pan L H, Li X W, Qin S P, et al. A Multi-agent Model of Changes in Urban Safety Livability[J]. Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International (S0037-5497), 2020, 28(1): 1-17.