

1-20-2024

## Research on Campus Epidemic Evolution Based on Multi-scale Modeling and Simulation in Microscopic & Microscopic View

Mingwei Hu

*College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; State Key Laboratory of Intelligent Geotechnics and Tunnelling, Shenzhen 518060, China; Key Laboratory for Resilient Infrastructures of Coastal Cities of Ministry of Education, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; Underground Polis Academy, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China, humw@szu.edu.cn*

Wenjie Yang

*College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China*

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. For more information, please contact [xtfzxb@126.com](mailto:xtfzxb@126.com).

---

# Research on Campus Epidemic Evolution Based on Multi-scale Modeling and Simulation in Microscopic & Microscopic View

## Abstract

**Abstract:** High density of population leads to high possibility of cross-infection. It is necessary to focus on campus epidemic prevention and control. Basing on existing studies in macroscopic or microscopic view, this paper proposed a multi-scale means to analyze a short-term evolution of Corona virus disease 2019 (COVID-19) on campus and estimated the efficiency of prevention strategies. Macroscopic model was based on the susceptible-exposed-infections-recovered(SEIR) model, which exported the time curve of the number of asymptomatic patients and symptomatic patients. Microscopic model combined discrete event simulation modeling and agent-based modeling to simulate the behavior of campus students and the state evolution caused by infectious disease in real-world, and simulated propagation process of COVID-19 on campus, which outputted the population in infection. Through experimental verification of case study, proving the efficiency of peak stagger to school and taking routine nuclear acid testing then isolating patients. Distinguish key parameters by taking sensitivity analysis. The simulation results can provide a reference for the school management to optimize epidemic prevention measures.

## Keywords

campus epidemic prevention, corona virus disease 2019 (COVID-19), modeling & simulation, macroscopic model, microscopic model, multi-scale modeling, agent based, susceptibleexposed-infections-recovered(SEIR) model

## Recommended Citation

Hu Mingwei, Yang Wenjie. Research on Campus Epidemic Evolution Based on Multi-scale Modeling and Simulation in Microscopic & Microscopic View[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(1): 170-182.

## 基于宏微观多尺度建模的校园疫情演化仿真研究

胡明伟<sup>1,2,3,4</sup>, 杨文杰<sup>1</sup>

(1. 深圳大学 土木与交通工程学院, 广东 深圳 518060; 2. 极端环境岩土和隧道工程智能建养全国重点实验室, 广东 深圳 518060;  
3. 深圳大学滨海城市韧性基础设施教育部重点实验室, 广东 深圳 518060; 4. 深圳大学未来地下城市研究院, 广东 深圳 518060)

**摘要:** 校园师生人群聚集密度高, 是疫情防控的重点和难点。基于现有宏微观尺度的研究, 提出使用多尺度建模仿真分析校园内新冠疫情的演化趋势和防控方案的绩效。宏观建模采用易感-潜伏-传染-恢复(SEIR)模型, 输出无症状患者和有症状患者数量随时间变化的曲线, 研究疫情演化趋势; 微观建模采用离散事件建模仿真和基于智能体建模, 对个体学生的在校行为和疫情演化进行微观仿真, 模拟新冠病毒在校园内的人传人过程。并通过案例研究, 验证错峰上学、核酸检测“每天一检”并隔离阳性患者方案的有效性, 通过对参数的灵敏度分析识别关键参数。结果表明, 多尺度疫情建模仿真方法, 从不同的角度和层级揭示了校园疫情的演化过程, 可为校方优化防疫方案提供参考。

**关键词:** 校园疫情防控; 新型冠状病毒肺炎; 建模仿真; 宏观模型; 微观模型; 多尺度建模; 基于智能体; SEIR模型

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2024)01-0170-13

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0750

**引用格式:** 胡明伟, 杨文杰. 基于宏微观多尺度建模的校园疫情演化仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(1): 170-182.

**Reference format:** Hu Mingwei, Yang Wenjie. Research on Campus Epidemic Evolution Based on Multi-scale Modeling and Simulation in Microscopic & Microscopic View[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(1): 170-182.

## Research on Campus Epidemic Evolution Based on Multi-scale Modeling and Simulation in Microscopic &amp; Microscopic View

Hu Mingwei<sup>1,2,3,4</sup>, Yang Wenjie<sup>1</sup>

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;

2. State Key Laboratory of Intelligent Geotechnics and Tunnelling, Shenzhen 518060, China;

3. Key Laboratory for Resilient Infrastructures of Coastal Cities of Ministry of Education, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;

4. Underground Polis Academy, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

**Abstract:** High density of population leads to high possibility of cross-infection. It is necessary to focus on campus epidemic prevention and control. Basing on existing studies in macroscopic or microscopic view, this paper proposed a multi-scale means to analyze a short-term evolution of Corona virus disease 2019 (COVID-19) on campus and estimated the efficiency of prevention strategies. Macroscopic model was based on the susceptible-exposed-infections-recovered(SEIR) model, which exported the time curve of the number of asymptomatic patients and symptomatic patients. Microscopic model combined discrete event simulation modeling and agent-based modeling to simulate the behavior of campus students and the state evolution caused by infectious disease in real-world, and simulated propagation process of COVID-19 on campus, which outputted the population in infection. Through experimental verification of case

收稿日期: 2022-06-29

修回日期: 2022-10-08

第一作者: 胡明伟(1972-), 男, 教授, 博士, 研究方向为智慧交通、智慧城轨、复杂系统建模与仿真。E-mail: humw@szu.edu.cn

study, proving the efficiency of peak stagger to school and taking routine nuclear acid testing then isolating patients. Distinguish key parameters by taking sensitivity analysis. The simulation results can provide a reference for the school management to optimize epidemic prevention measures.

**Keywords:** campus epidemic prevention; corona virus disease 2019 (COVID-19); modeling & simulation; macroscopic model; microscopic model; multi-scale modeling; agent based; susceptible-exposed-infections-recovered(SEIR) model

## 0 引言

新型冠状病毒疫情被世界卫生组织列为国际关注的突发公共卫生事件。校园师生人群聚集密度大, 教学空间相对封闭, 容易发生呼吸道传染病流行, 是新冠疫情防控的重点。2021年7月26日, 教育部办公厅、国家卫生健康委办公厅发布《关于进一步加强新冠肺炎疫情防控常态化下学校卫生管理工作的通知》<sup>[1]</sup>, 并多次发布公告予以强调, 要求做好校园疫情防控工作。2021年9月, 在福建疫情中, 学校成为该轮疫情的重要传播地点。小学及托幼机构的3~12岁的部分学生尚未接种新冠病毒疫苗, 是新冠易感者<sup>[2]</sup>。2022年6月27日, 国务院应对新型冠状病毒肺炎疫情联防联控机制综合组制定的《新型冠状病毒肺炎防控方案(第九版)》中将高等学校、中小学校定义为重点机构, 即维持社会正常运转或容易发生聚集性疫情的机构<sup>[3]</sup>。因此研究新冠肺炎在校园内的传播规律和防控措施具有重要意义。

研究新冠肺炎病毒疫情, 存在两个难点: ①新冠肺炎病毒危害性大, 传染性极强, 因此无法在现实世界中通过实验分析疫情演化过程, 从而评估防控措施的有效性。②基于经验制定的防疫措施不一定能及时应对病毒变异: 2022年1月12日, 世界卫生组织总干事在 COVID-19 疫情媒体通报会上的讲话<sup>[4]</sup>中表明, 近期“感染的激增是由奥密克戎变异株引起的, 该变异株正在几乎所有国家迅速取代德尔塔。”由于奥密克戎变异株感染者多表现为无症状, 隔离措施难以及时介入, 因此需要评估防控措施有效性的方法。

针对上述问题, 建模仿真方法提供了可行的

解决方案。目前, 中外已有研究利用建模仿真方法分析疫情演化和疫情防控, 并取得相应成果: 传染病演化预测建模方面, 主流方法是基于统计学预测疾病的传播概率模型, 如易感-传染(susceptible-infections, SI)模型、易感-传染-易感(susceptible-infections-susceptible, SIS)模型、易感-传染-恢复(susceptible-infections-recovered, SIR)模型、易感-潜伏-传染-恢复(susceptible-exposed-infections-recovered, SEIR)模型等<sup>[5-8]</sup>。疫情防控仿真方面, 汪婧等<sup>[9]</sup>使用改进 SEIR 模型将感染人群分为无症状感染者、轻症感染者、重症感染者和危重症感染者, 在拟合现实数据的基础上进行仿真实验, 分析不同感染人群的传播率对疫情发展的影响。Ciunkiewicz 等<sup>[10]</sup>基于智能体建模方法设计一类针对单独设施(如办公楼、校园)的流行病学仿真模型, 输出传染病模型中各类型人群的比例以及各智能体感染风险随时间变化的曲线; 胡明伟等<sup>[11]</sup>基于 Anylogic 平台的系统动力学建模, 提出改进的交通出行易感度计算模型, 对地铁站客流防疫调控进行仿真; 孙皓宸等<sup>[12]</sup>基于校园真实学生接触数据改进了传统的 SEIR 模型, 提出了一种连续感染模型, 对新冠肺炎的校园传播与防控策略进行了分析。

现有关于疫情的仿真研究多为特定情境下单一尺度的建模: ①针对局部小范围地区的新冠肺炎病毒疫情传播的研究较少; ②单一尺度的建模存在局限性: 宏观模型能揭示疫情演化的长期趋势, 但对于一些关键参数如平均接触人数, 需要基于往期官方公布的数据进行拟合, 存在滞后性; 微观模型能对案例场景进行细致仿真, 但在宏观场景和长期预测上存在工程量大、成本高的局限

性。本研究考虑新型冠状病毒传播特点，基于仿真软件 AnyLogic，提出同时使用宏观模型与微观模型的多尺度建模仿真：微观方面，使用基于离散事件建模和智能体建模相结合的方法，模拟隔离措施尚未介入时，无症状学生在校园内正常活动导致新冠病毒的校园传播过程，输出患者数量；宏观方面，构建 SEIR 模型，以微观模型输出数据作为参数校准依据，使用 AnyLogic 软件的参数校准 OptQuest 优化方法，对宏观模型中的关键参数进行校准，与文献中的宏观模型参数对比，并分析参数差异。并通过案例研究，评估错峰上学措施以及“每天一检”核酸检测防控措施对校园疫情演化的影响，验证建模仿真方法评估防疫措施的可行性，从而为学校运营管理方采取科学防疫措施和评价提供参考。

## 1 建模仿真方法

### 1.1 研究框架

本文研究从宏观和微观两个尺度进行建模和评价，研究框架如图1所示。

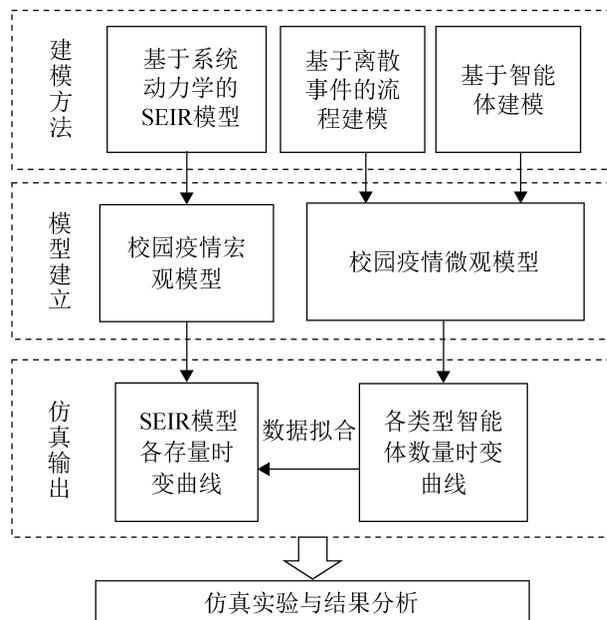


图1 研究框架

Fig. 1 Research framework

基于改进的SEIR模型，构建校园疫情演化宏观模型，仿真模拟模型中的各存量(易感者、潜伏者、感染者、移出者)的动态变化。使用基于离散事件的流程建模和基于智能体相结合的方法，构建校园疫情演化微观模型，仿真模拟学生在校园内的走行行为和感染病毒后的状态变化，通过对比仿真输出结果，评价不同防控措施对疫情防控的影响。

### 1.2 宏观模型构建

系统动力学(system dynamics, SD)方法通过定义时变变量以及变量之间的转化关系，分析研究各变量的时变特征及其组成系统的信息反馈<sup>[13]</sup>。目前研究所采用的传染病演化预测宏观模型，如SI、SIS、SIR、SEIR，均可以通过系统动力学方法进行构建。《新型冠状病毒肺炎诊疗方案(试行第八版)》指出，新冠肺炎在潜伏期即有传染性，且感染后可获得一定的免疫力<sup>[14]</sup>。潜伏者，以及无症状患者对疫情传播有重要影响，而SI、SIS、SIR模型均没有在系统中对其单独考虑。因此，考虑到潜伏期患者且不考虑病愈患者反复感染病毒的SEIR模型宜作为研究新冠疫情演化仿真的宏观模型。而SEIR模型中的研究对象——易感者、潜伏者、感染者、康复者都是时变的动态量，研究对象群体之间存在反馈，因此可用系统动力学建模方法实现SEIR模型。由于奥密克戎病毒隐匿性强，潜伏期患者与无症状患者之间难以区分，因此本文假设携带新冠肺炎病毒的潜伏者即为无症状患者；有病状表现的感染者即为有症状患者，此后不再对相关表述进行区分。

SEIR模型将研究对象群体分为4类：易感者(susceptible)、潜伏者(exposed，处于潜伏期，已感染病毒但没有明显症状，一段时间后成为感染者)、感染者(infections，已感染病毒且有明显症状)、移出者(recovered, removed)，记 $\beta$ 为感染病毒的概率， $\alpha$ 为潜伏者转化为感染者的概率， $\gamma$ 为病愈概率，其模型示意图如图2所示<sup>[15]</sup>。

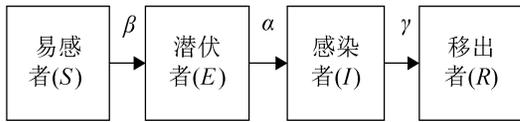


图2 SEIR 模型结构  
Fig. 2 Structure of SEIR model

根据 SEIR 模型, 列出如下微分方程:

易感者数量变化速率:

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

潜伏者数量变化速率:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{r\beta S}{N} - \alpha E \quad (2)$$

感染者数量变化速率:

$$\frac{dI}{dt} = \alpha E - \gamma I \quad (3)$$

移出者数量变化速率:

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

式中:  $S$ 、 $E$ 、 $I$ 、 $R$  分别为易感者、潜伏者、感染

者、移出者;  $r$  为潜伏者日均接触人数;  $N$  为研究对象总人数。

### 1.3 微观模型构建

微观模型的构建需要两种建模方法: 基于离散事件的流程建模和基于智能体建模。基于离散事件的流程建模用于描述学生智能体在仿真的虚拟空间中的时空变化; 基于智能体建模用于描述学生智能体染病后的状态变化。

#### 1.3.1 基于离散事件的流程建模

离散系统是指系统的状态变量在某些离散的时间点瞬时变化。实体流图法是建模方法之一, 可以表示事件、状态变化及实体间相互作用的逻辑关系。

本次研究中, 学校有严格的作息时间安排, 因此学生在不同时刻所在的空间位置的变化, 使用了实体流图法进行离散事件建模, 其流程框图如图3所示。

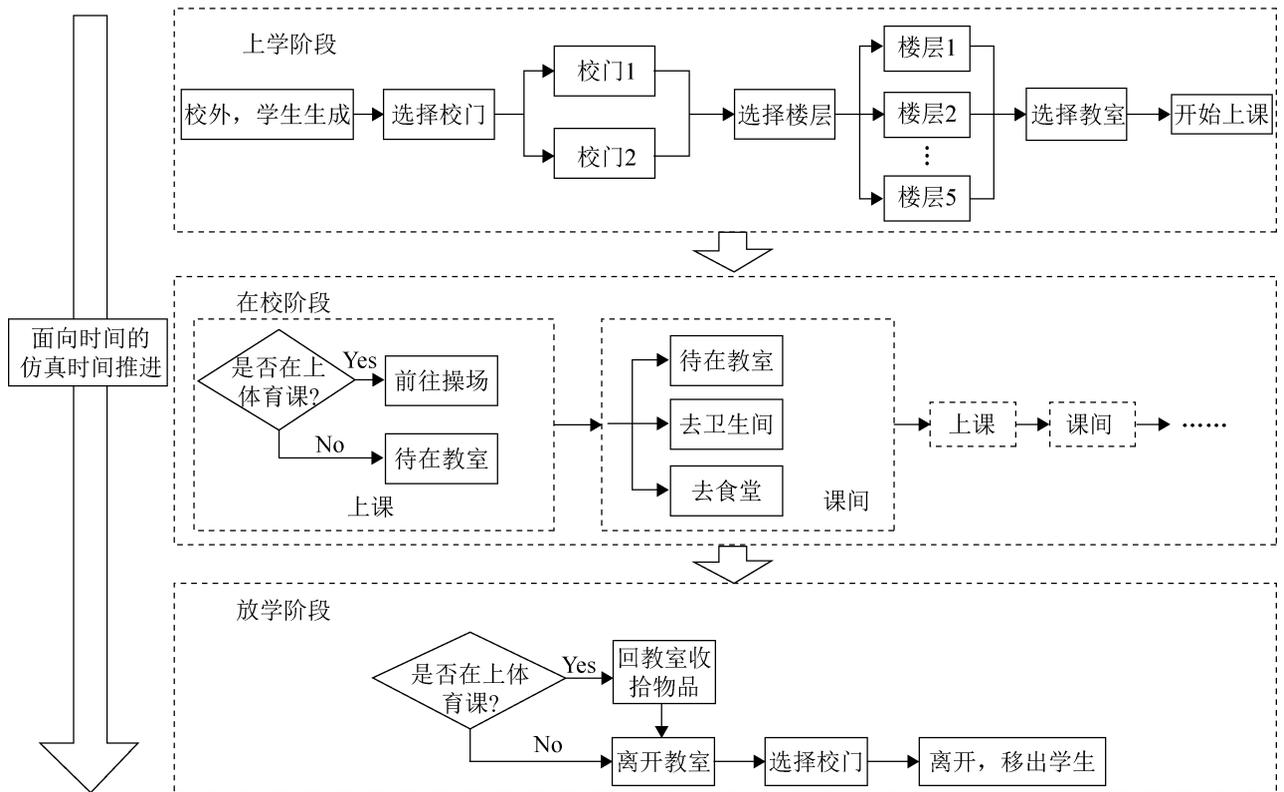


图3 基于离散事件的流程建模结构  
Fig. 3 Structure of discrete event simulation modeling

### 1.3.2 基于智能体建模

智能体建模不需要把握系统的整体行为，也不需要识别并抽象出系统中的关键参数。它是一种自下而上构建的模型，通过定义各智能体的属性、行为、时空变化，以及各智能体之间的交互和信息传递，就能够识别并获取模型的输出。

本次研究中，学生智能体自身有着“健康→潜伏期→生病期”的状态变化，其行为逻辑框图如图4所示。

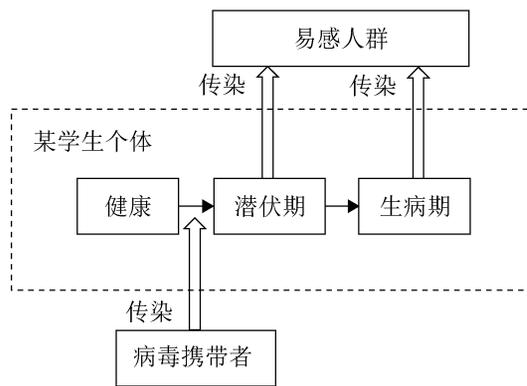


图4 基于智能体建模结构

Fig. 4 Agent-based modeling structure

仿真开始时，首先随机向一名学生发送“感

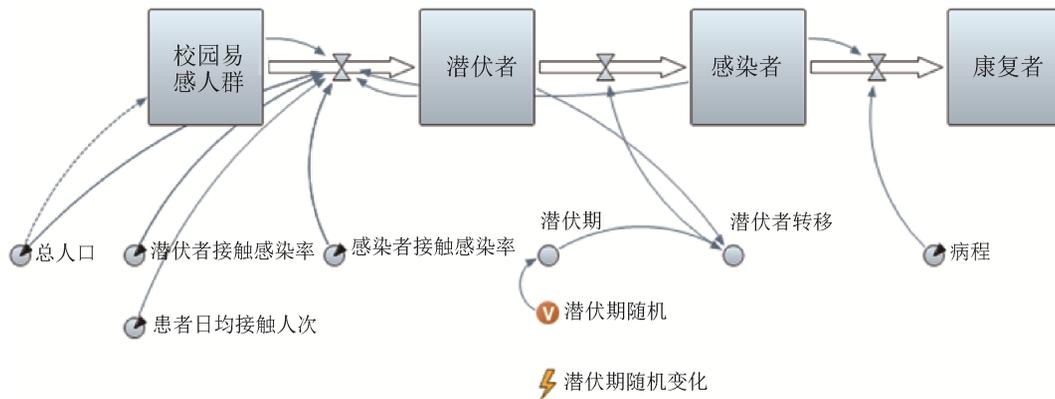


图5 系统动力学建模

Fig. 5 System dynamics modeling

## 2.2 校园疫情演化微观模型

### 2.2.1 基于离散事件的流程建模

在仿真软件 AnyLogic 进行基于离散事件的流

染病毒”信息，将该学生标记为无症状患者，该学生从健康状态转变为潜伏期状态。随后，该学生与其他学生的空间距离小于等于病毒传播距离时，向其他学生依感染概率发送“感染病毒”的消息。其中成功被感染病毒的学生从健康状态转变为潜伏期状态，并标记为有症状患者，模拟病毒扩散。潜伏期状态在一定时间后转变为患病期，假设患病期病人的传染概率与潜伏期病人的传染概率存在差异。

## 2 基于 AnyLogic 软件建立仿真模型

### 2.1 校园疫情演化宏观 SEIR 模型

使用系统动力学方法建立 SEIR 模型，在 AnyLogic 的系统动力学建模库中，存量(stock)对应状态变量，流量(flow)对应速率变量，图形化建模部分见图5。SEIR 模型中的“康复者”同时包括病愈和死亡人数；病程 $\omega$ 指疾病从发现到结束的时间，病程结束存在两种结果：病愈和死亡，因此有症状患者向康复者转移的速率为

$$\frac{dI}{dt} = \frac{1}{\omega} \quad (5)$$

程建模，需要构建空间三维模型和定义逻辑模块流程图<sup>[16]</sup>。通过逻辑模块流程图定义学生在空间中的移动。上学阶段逻辑模块流程图定义如图6

所示, 学生首先随机选择两个校门之一排队进校, 随后再随机选择教学楼的入口, 进入教学楼第1层。在校阶段与放学阶段逻辑模块流程图定义如图7所示, 学生首先进入上课过程, 进入教室后等待(Wait模块)40 min, 模拟上课过程。上课过程结束, 判定是否进入放学阶段: 若否, 则进入课

间活动选择, 随后返回上课过程; 若是, 则判定学生是否在上体育课。若是体育课, 则返回教室等待5 min, 模拟拿书包过程, 然后离开教室; 若不是体育课, 则直接离开教室。离开教室后等概率选择下楼楼梯、教学楼出口和学校大门, 为图6逆过程。

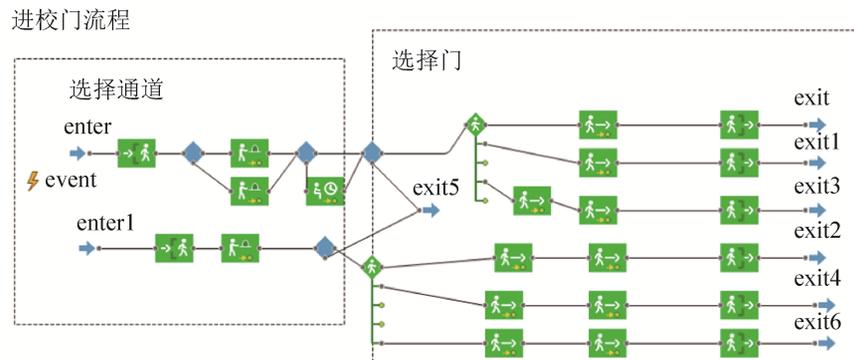


图6 上学阶段逻辑模块流程图  
Fig. 6 Logic blocks in go-to-school stage

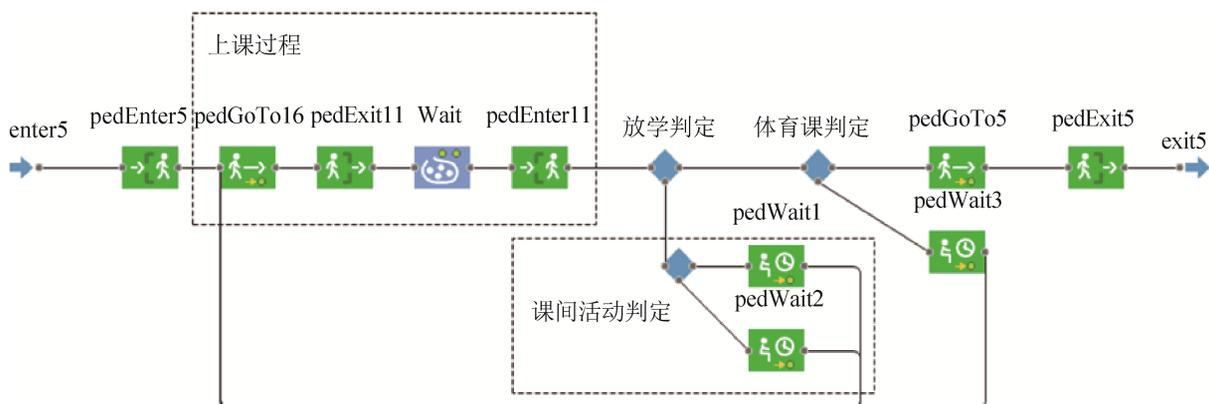


图7 在校阶段与放学阶段逻辑模块流程图  
Fig. 7 Logic blocks in at-school stage and leaving-school stage

### 2.2.2 基于智能体建模

本次研究中定义了学生智能体, 定义学生智能体两个方面的行为: 一是智能体自身的状态变化, 见图8(a), 学生智能体初期处于健康状态, 当接收到系统或其他智能体发送的“感染”信息时, 成为无症状感染者, 经过模型时间中的潜伏期天数, 成为有症状患者; 二是智能体空间移动的位置变化, 见图8(b)。在基于离散事件的流程建模中, 逻辑流程图中的“到达”(图7中 pedGoTo)

与“等待”(图7中 pedWait)模块与空间模型中的特定位置(如学校门口)或区域(如教室)相匹配, 实现离散时间与空间模型的结合。随着仿真时间推进, 到达逻辑流程图中的某一模块时, 向学生智能体发送特定的信息, 使学生智能体所在空间位置标记的改变, 并判断相同空间标记的健康智能体与无症状感染者智能体之间是否会发生感染, 实现基于离散事件的流程建模与基于智能体建模的结合。

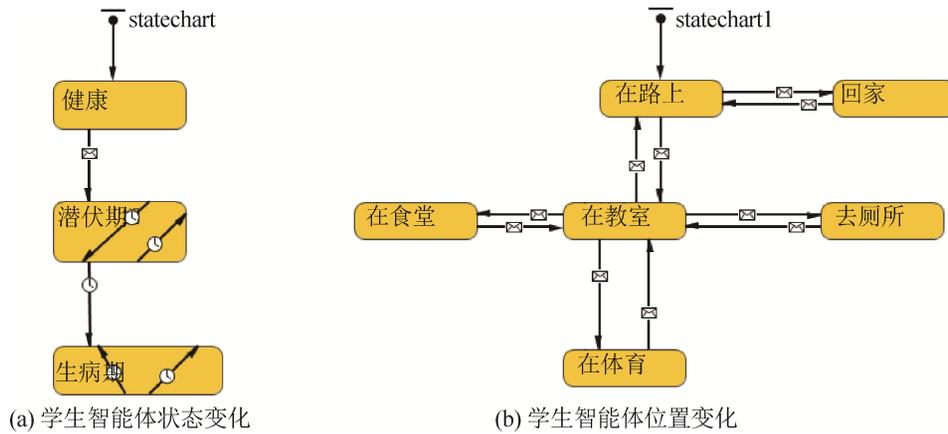


图 8 智能体状态图  
Fig. 8 Statechart of agent

### 3 建模仿真案例

本研究建模仿真对象为深圳某小学，学校教学楼平面图、学生规模、学生日常行为等参数均由学校管理方提供。仿真实验目标为：通过微观模型仿真，得到输出的无症状患者与有症状患者的时间序列数据，对比不同管控措施的效果，并将时间序列数据作为宏观模型的参数校准根据。基于参数校准后的宏观模型，对模型中假设的参数进行灵敏度分析。

仿真实验分为 3 组：第 1 组为对照组，不采取特殊方案；第 2 组采用错峰上学方案；第 3 组采用核酸检测方案，方案设置在相应模型中有具体表述。考虑到疫情常态化防控要求公共场合所有人均需佩戴口罩，故假设案例中所有人都佩戴口罩。

由于目前对新冠肺炎患者接触过物体的病毒残留时间与传播概率研究较少，故假设场所严格执行终末消毒，忽略新冠病毒通过患者接触物体传播的影响。

#### 3.1 微观模型仿真与输出

构建空间模型，学校平面俯视图与教学楼三维立体图如图 9 所示。本次研究中，校园总人口为 2 500 人，系统随机给一位学生智能体发送感染信息，使其转变为无症状患者，且对该智能体不进行干预，研究发热人数随时间的变化以及校园内教室传染与走廊传染的人数分布。文献[10]设定潜伏者每分钟接触感染概率与感染者每分钟接触感染概率分别为  $6 \times 10^{-4}$  与  $1 \times 10^{-3}$ 。参数汇总表见表 1。

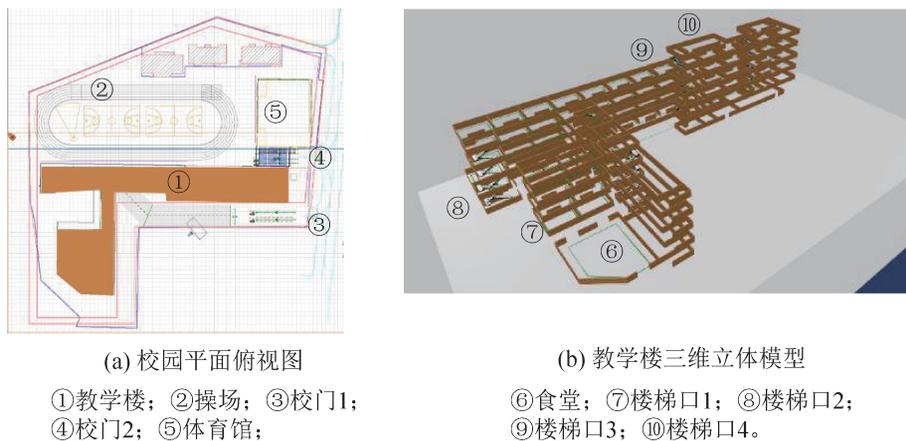


图 9 校园模型

Fig. 9 Model of school

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

表1 微观模型参数  
Table 1 Parameters of microcosmic model

参数名称	数值
校园总人口	2 500
接触无症状患者每分钟感染率	$6 \times 10^{-4}$
接触有症状患者每分钟感染率	$1 \times 10^{-3}$
潜伏期/d	3~7

微观模型仿真实验分为3组: 第1组为对照组, 另外两组作为控制变量的实验组; 第2组采用错峰上学方案, 错峰时间表将一~六年级按年级合并为3组, 一年级和二年级、三年级和四年级、五年级和六年级, 每组第一节课开始的时刻相差15 min, 并规定每组必须在第一节课开始时刻的前15 min内到达校园, 每组每节课时长均为40 min, 课间休息均为10 min, 由于每组第一节课开始的时刻不同, 因此每组后续课程和课间的开始时刻均不同, 以减少不同组之间的接触; 第3组采用“每天一检”核酸检测流程, 当系统中出现一例有症状患者时, 每天进行一次核酸检测, 将核酸检测结果为阳性的学生进行隔离处置, 核酸检测组的智能体状态图见图10。

每组实验中, 模型运行仿真时间7 d, 统计每天的发热人数, 每组模型运行10次取算术平均值。结果见表2。

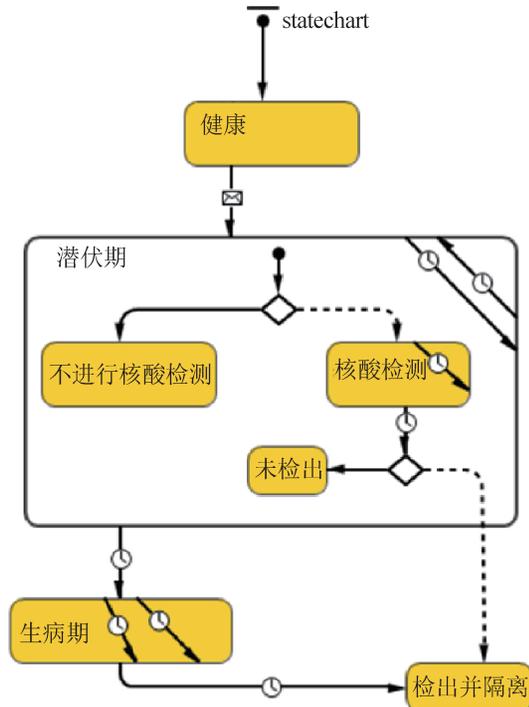


图10 核酸检测组的智能体状态图

Fig. 10 Agent statechart of nuclear acid testing group

表2 微观模型输出数据  
Table 2 Output data of microcosmic model

天数	对照组		错峰上学		核酸检测	
	无症状患者数量	有症状患者数量	无症状患者数量	有症状患者数量	无症状患者数量	有症状患者数量
1	1	0	1	0	1	0
2	3	0	1	0	2	0
3	6	1	4	1	3	1
4	10	2	6	1	4	2
5	20	4	8	2	2	1
6	35	8	10	5	1	0
7	89	22	16	6	1	0

### 3.2 宏观SEIR模型仿真与输出

校园易感人群初始数量为2 499, 无症状患者初始数量为1, 文献[17]中取自然状态下每人日接触人数10人, 无症状患者与有症状患者的病毒传染概率均为0.045。文献[14]指出新冠肺炎的潜伏期为3~7 d。宏观SEIR模型仿真实验分为3组: 第1组为对照组, 不采取特殊方案; 第2组、第3组

均为实验组; 第2组采用错峰上学方案; 第3组采用“每天一检”核酸检测措施。第1组日均接触人次初始值采用文献[17]使用的数据, 即10人。第2组采用错峰上学方案, 学生近似分为数量相等的3个批次, 初始值取日均接触人次为4人, 第2组中未对有症状学生进行干预, 因此无症状患者日均接触人次与有症状患者日均接触人次相同,

第 1 组与第 2 组系统动力学建模如图 5 所示，图中病程为假设值，设置为 14 d。第 3 组实验对患病学生进行管控：当有症状患者数量大于 1，对有症状患者进行隔离，并启动全员核酸检测“每天一检”程序，对检出为阳性的无症状患者进行隔离。第 3 组系统动力学建模如图 11 所示，图中，“反应滞

后期”为发现有症状患者后进行应对措施的延迟，假设为 1 h；“核酸检测灵敏度”即为患者检出阳性的概率，文献[18]指出目前现有的 7 种核酸检测试剂对新冠肺炎病毒 3 种变异株的灵敏度均大于 85%，故假设为 85%。SEIR 模型初始参数设置见表 3。

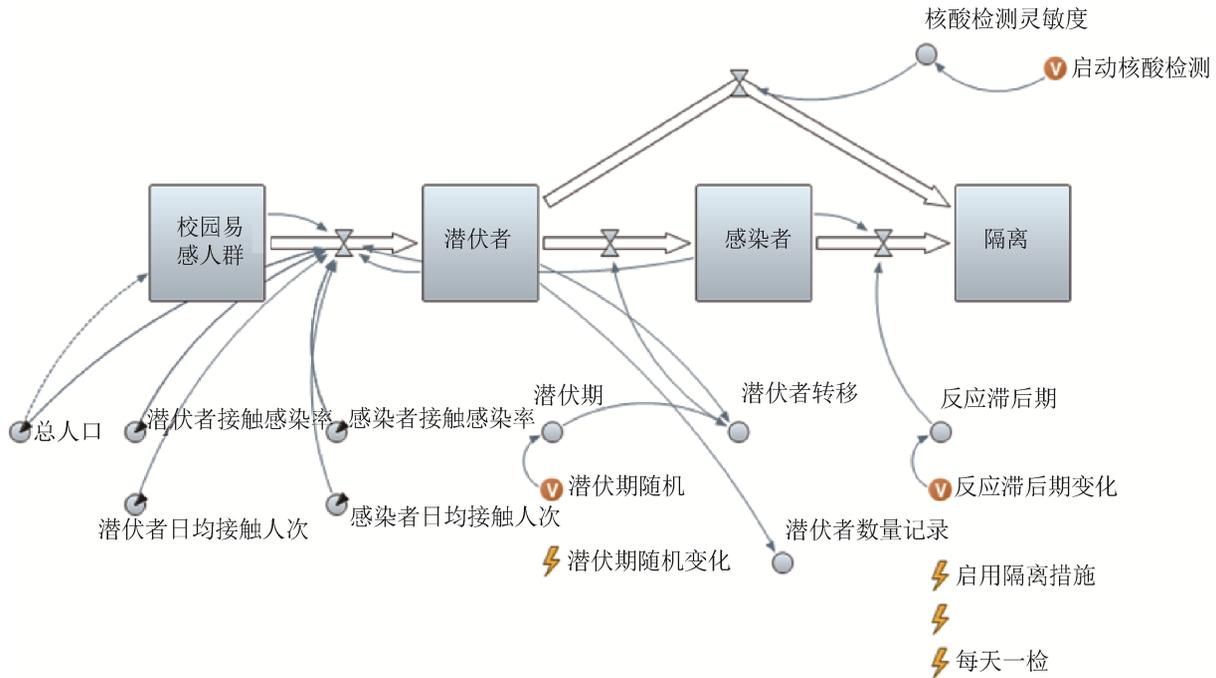


图 11 核酸检测组的系统动力学建模

Fig. 11 System dynamics modeling of nuclear acid testing group

表 3 SEIR 模型初始参数

Table 3 Initial parameters of SEIR model

参数名称	数值
校园易感人群(人)	2 499
接触无症状患者的初始感染率	0.045
接触有症状患者的初始感染率	0.045
潜伏期/d	3~7
病程/d	14
错峰上学每人日均接触人数初始值(人)	4
对照组每人日均接触人数初始值(人)	10
反应滞后期/h	1
核酸检测灵敏度/%	85

每组实验中的模型运行仿真时间 7 d，统计无症状患者、有症状患者人数。宏观 SEIR 模型初始输出结果通过四舍五入取整，作为参数校准的初始数据。

### 3.3 输出结果拟合与分析

现有的疫情仿真研究中，宏观模型多用于大范围片区的趋势预测，鲜见用于局部小范围地区<sup>[4-8]</sup>。由于新冠肺炎疫情已引起各国重视，大范围片区的疫情数据易获取，且同等规模的研究对象可以直接引用文献中的相关参数，参数标定难度相对低。局部小范围地区应用宏观模型由于现实统计数据和相关研究少，存在参数标定的困难。故本文提出基于微观模型输出数据进行参数标定的方法，标定的基准数据采用宏观模型与微观模型输出的前 7 日无症状与有症状患者数量，标定对象参数为宏观模型的错峰上学组每人日均接触人数、对照组每人日均接触人数、接触无症状患

者的感染率、接触有症状患者的感染率。

以微观模型中, 第1组和第2组的输出数据为基准, 使用AnyLogic软件的OptQuest优化方法进行参数校准, 以宏观模型与微观模型输出结果之差最小为优化目标, 设置迭代次数为500次, 使宏观模型输出结果与微观模型相近, 最终得出第1组和第3组(核酸检测组)每人日均接触人数为26、第2组(错峰上学组)每人日均接触人数为17、接触无症状患者的感染率为0.019、接触有症状患者的感染率为0.056, 参数校准结果见表4。按校准参数运行的SEIR模型输出结果见表5, 将无症状患者与有症状患者数量之和定义为患者总数, 宏观模型输出的患者总数的时间序列数据见表6, 时间折线图如图12所示。

表4 参数校准结果

Table 4 Result of parameter calibration

参数名称	数值
错峰上学组每人日均接触人数	17
对照组每人日均接触人数	26
接触无症状患者的感染率	0.019
接触有症状患者的感染率	0.056
错峰上学最优目标函数值	0.70
对照组最优目标函数值	0.86

表5 SEIR模型输出数据

Table 5 Output data of SEIR model

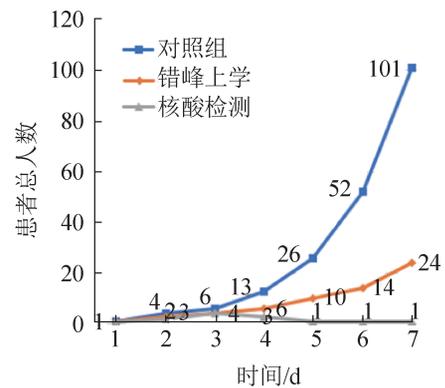
天数/ d	患者数量					
	对照组		错峰上学		核酸检测	
	无症状	有症状	无症状	有症状	无症状	有症状
1	1	0	1	0	1	0
2	3	1	2	1	2	0
3	5	1	3	1	3	1
4	10	3	4	2	2	1
5	20	6	7	3	1	0
6	40	12	10	4	1	0
7	78	23	17	7	1	0

微观模型中, 对比第7天仿真结果, 采用错峰上学措施, 无症状患者数量降低82.02%, 有症状患者数量降低72.73%; 采用核酸检测措施, 无症状患者数量降低98.87%, 有症状患者数量降低100%。

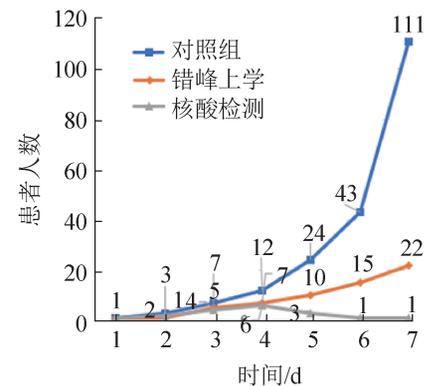
表6 患者总数输出数据

Table 6 Output data of total patients

天数/d	对照组		错峰上学		核酸检测	
	宏观模型	微观模型	宏观模型	微观模型	宏观模型	微观模型
1	1	1	1	1	1	1
2	4	3	3	1	2	2
3	6	7	4	5	4	4
4	13	12	6	7	3	6
5	26	24	10	10	1	3
6	52	43	14	15	1	1
7	101	111	24	22	1	1



(a) 宏观模型



(b) 微观模型

图12 宏微观模型的患者总数时间折线图

Fig. 12 The time plot of macroscopic and microscopic models

对比参数标定前后的日均接触人数, 标定后错峰上学组日均接触人数为文献[17]的4.25倍, 对照组日均接触人数为初值的2.6倍。

基于参数校准后的宏观模型, 以核酸检测的实验组为研究对象, 以患者总数为指标, 对核酸检测灵敏度、反应滞后期两个参数分别进行灵敏

度分析：对核酸检测灵敏度进行灵敏度分析时，考虑未来新变异株可能会降低现有核酸检测方法的灵敏度，因此将原实验中的85%作为数值上限，以5%为步长，对比85%、80%、75%、70%、65%、60%的患者总数的时间序列数据；对反应

滞后期进行灵敏度分析时，考虑发现有症状患者后执行力度的强弱，将原实验中的1 h作为上限（反应最快），以0.5 h为步长，对比1、1.5、2、2.5、3、3.5 h的患者总数的时间序列数据，灵敏度分析图像如图13所示。

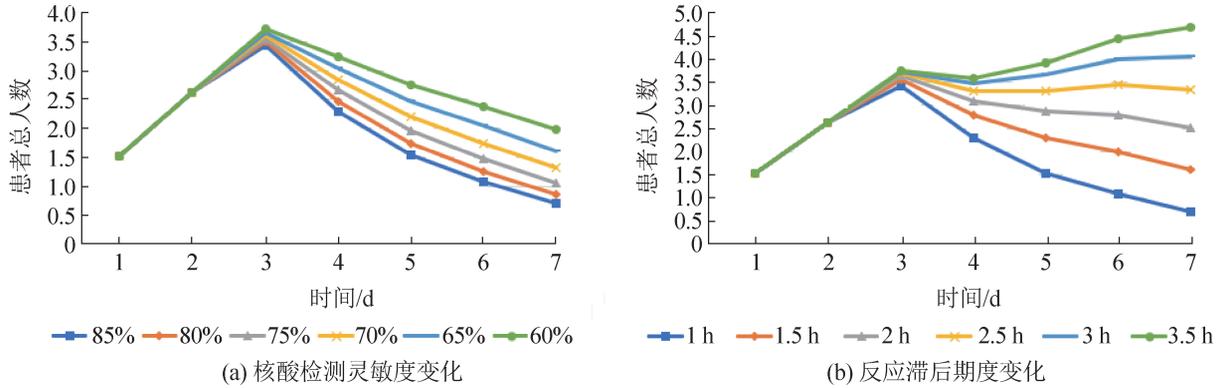


图13 宏观模型参数灵敏度分析

Fig. 13 Parameter sensitivity analysis of macroscopic models

## 4 结论

研究校园情景中新冠疫情演化，建立校园疫情演化微观模型和宏观模型，通过数据拟合标定参数，确定宏观模型中日均接触人数的参数值。并以采取错峰上学措施为例，验证模型有效性。

(1) 提出一种基于宏观和微观模型的多尺度校园疫情建模仿真方案，尝试解决宏观模型的部分关键参数标定的困难。参数校准结果表明，在校园情景中，宏观SEIR模型的日均接触人数较文献[17]的假设值要高，说明学校的人员集聚性与大范围片区相比更显著，因此是疫情防控的重点场所。且针对小范围局部地区的新冠肺炎传染病传播研究不应直接使用以往研究中大范围片区的传染病模型参数，需要使用新方法对模型进行参数校准。

(2) 仿真案例的微观模型输出结果表明，错峰上学可以有效降低日均接触人次，从而降低疫情扩散的影响，对校园疫情早期防控有重要意义；核酸检测以及隔离措施能及时有效地发现传染源并抑制疾病传播，防控力度强的情景下(如每天一检，及时发现有症状患者并采取隔离措施等)，对

不同的日均接触人数、传染概率情况中的疾病传播均有强抑制作用，是目前效果最显著的措施。

(3) 仿真案例的宏观模型中，采用“一天一检”核酸检测措施的参数灵敏度分析结果表明，保持反应滞后期为1 h的情况下，患者数量对核酸检测灵敏度变化反应不显著：即保持“一天一检”的情况下，即使病毒变异导致核酸检测灵敏度下降，核酸检测仍对疫情扩散有较强的抑制作用；保持核酸检测灵敏度为85%的情况下，患者数量对核酸检测灵敏度变化反应显著，当反应滞后期大于2.5 h，患者数量呈上升趋势，由此可知，及时发现有症状患者并快速进行隔离是疫情防控的重点。

(4) 本次研究构建的宏观模型为传统SEIR模型，参数选择与系统组定义具有普遍性。但对于校园疫情研究，可以对系统进行更深入的研究，如考虑到教职工与学生的行动差异，可以在微观模型中将人群定义为学生与教职工两种群体进行精细建模。

(5) 本文基于微观模型数据对宏观模型参数进

行标定, 解决宏观模型在局部小范围地区应用上参数标定的困难, 但由于目前针对局部小范围地区的疫情防控仿真研究较少, 且缺少现实案例数据对微观模型进行参数标定, 微观模型仍存在不足之处。

### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国教育部. 教育部办公厅 国家卫生健康委办公厅关于进一步加强新冠肺炎疫情防控工作常态化下学校卫生管理工作的通知: 教体艺厅函(2021)34号[EB/OL]. (2021-07-26) [2022-06-12]. [http://www.moe.gov.cn/srcsite/A17/moe\\_943/s3285/202108/t20210802\\_548310.html](http://www.moe.gov.cn/srcsite/A17/moe_943/s3285/202108/t20210802_548310.html).
- [2] 福建省教育厅. 省教育厅、卫健委发布通知, 部署进一步做好秋季学期学校疫情防控工作[EB/OL]. (2021-09-12) [2022-06-12]. [http://jyt.fujian.gov.cn/jyyw/ttxw/202109/t20210912\\_5686646.htm](http://jyt.fujian.gov.cn/jyyw/ttxw/202109/t20210912_5686646.htm).
- [3] 疾病预防控制局. 关于印发新型冠状病毒肺炎防控方案(第九版)的通知: 联防联控机制综发(2022)71号[EB/OL]. (2022-06-28) [2022-06-28]. <http://www.nhc.gov.cn/jkj/s3577/202206/de224e7784fe4007b7189c1f1c9d5e85.shtml>.
- [4] World Health Organization. WHO Director-general's Opening Remarks at the Media Briefing on COVID-19 - 12 January 2022[EB/OL]. (2022-01-12) [2022-06-12]. <https://www.who.int/director-general/speeches/detail/who-director-general-s-opening-remarks-at-the-media-briefing-on-covid-19---12-january-2022>.
- [5] 孔庆凯, 邱志鹏, 邹云. 一类媒介-宿主传染病传播动力学模型分析[J]. 南京理工大学学报, 2012, 36(2): 304-308.  
Kong Qingkai, Qiu Zhipeng, Zou Yun. Dynamics Model Analysis of Vector-host Epidemic Disease Transmission [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2012, 36(2): 304-308.
- [6] 苗安琪, 张健, 王新阳, 等. 具有Beddington-DeAngelis发生率的随机SIS传染病模型的定性分析[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2018, 37(2): 39-46.  
Miao Anqi, Zhang Jian, Wang Xinyang, et al. Qualitative Analysis of Stochastic SIS Epidemic Model with Beddington-DeAngelis Incidence Rate[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2018, 37(2): 39-46.
- [7] 盛华雄, 吴琳, 肖长亮. 新冠肺炎疫情传播建模分析与预测[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(5): 759-766.  
Sheng Huaxiong, Wu Lin, Xiao Changliang. Modeling Analysis and Prediction on NCP Epidemic Transmission [J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(5): 759-766.
- [8] 路雪鹏, 尚娇, 赵俊辉, 等. 基于系统动力学的新冠病毒传播过程预测[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(7): 1713-1721.  
Lu Xuepeng, Shang Jiao, Zhao Junhui, et al. Transmission Process Prediction of Novel Coronavirus Based on System Dynamics[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(7): 1713-1721.
- [9] 汪婧, 董莹. 基于SEIR模型的COVID-19传播及防控仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(7): 1532-1546.  
Wang Jing, Dong Ying. Simulation Research on COVID-19 Transmission and Control Measures Based on SEIR Model[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(7): 1532-1546.
- [10] Ciunkiewicz P, Brooke W, Rogers M, et al. Agent-based Epidemiological Modeling of COVID-19 in Localized Environments[J]. Computers in Biology and Medicine, 2022, 144: 105396.
- [11] 胡明伟, 李微微, 陈湘生. 基于系统动力学的地铁客流防疫调控仿真分析[J]. 深圳大学学报(理工版), 2021, 38(2): 111-120.  
Hu Mingwei, Li Weiwei, Chen Xiangsheng. Simulation Analysis of Epidemic Prevention and Regulation for Metro Passenger Flow Based on System Dynamics[J]. Journal of Shenzhen University(Science and Engineering), 2021, 38(2): 111-120.
- [12] 孙皓宸, 刘肖凡, 许小可, 等. 基于连续感染模型的新冠肺炎校园传播与防控策略分析[J]. 物理学报, 2020, 69(24): 68-77.  
Sun Haochen, Liu Xiaofan, Xu Xiaoke, et al. Analysis of COVID-19 Spreading and Prevention Strategy in Schools Based on Continuous Infection Model[J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(24): 68-77.
- [13] 王其藩. 系统动力学[M]. 修订版. 上海: 上海财经大学出版社, 2009.  
Wang Qibo. System Dynamics[M]. Revision. Shanghai: Shanghai University of Finance & Economics Press, 2009.
- [4] 中华人民共和国国家卫生健康委员会办公厅, 中华人民共和国国家中医药管理局办公室. 新型冠状病毒肺炎诊疗方案(试行第九版)[J]. 中国医药, 2022, 17(4): 481-487.  
General Office of National Health Commission of the People's Republic of China, Office of National Administration of Traditional Chinese Medicine of the People's Republic of China. Corona Virus Disease-19 Prevention and Control Consensus Diagnosis and Treatment of Corona Virus Disease-19(9th Trial Edition) [J]. China Medicine, 2022, 17(4): 481-487.
- [15] 范如国, 王奕博, 罗明, 等. 基于SEIR的新冠肺炎传播模型及拐点预测分析[J]. 电子科技大学学报, 2020, 49(3):

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

- 369-374.  
Fan Ruguo, Wang Yibo, Luo Ming, et al. SEIR-based COVID-19 Transmission Model and Inflection Point Prediction Analysis[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2020, 49(3): 369-374.
- [16] 胡明伟, 黄文柯. 行人交通仿真方法与技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.
- [17] 耿辉, 徐安定, 王晓艳, 等. 基于SEIR模型分析相关干预措施在新型冠状病毒肺炎疫情中的作用[J]. 暨南大学学报(自然科学与医学版), 2020, 41(2): 175-180.  
Geng Hui, Xu Anding, Wang Xiaoyan, et al. Analysis of the Role of Current Prevention and Control Measures in the Epidemic of Corona Virus Disease 2019 Based on SEIR Model[J]. Journal of Jinan University(Natural Science & Medicine Edition), 2020, 41(2): 175-180.
- [18] 邹丽容, 黄洁, 郭前方, 等. 7种新型冠状病毒核酸检测试剂变异株检测性能比对分析[J]. 华南预防医学, 2022, 48(3): 400-402.  
Zou Lirong, Huang Jie, Guo Qianfang, et al. Inspection Technology Comparison of Mutant Detection Performance Among Seven Kinds of SARS-CoV-2 Nucleic Acid Detection Reagents[J]. South China Journal of Preventive Medicine, 2022, 48(3): 400-402.