

基于连续感染模型的新冠肺炎校园传播与防控策略分析

孙皓宸 刘肖凡 许小可 吴晔

Analysis of COVID-19 spreading and prevention strategy in schools based on continuous infection model

Sun Hao-Chen Liu Xiao-Fan Xu Xiao-Ke Wu Ye

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 240201 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20201106

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201106>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

新型冠状病毒肺炎早期时空传播特征分析

Analysis on early spatiotemporal transmission characteristics of COVID-19

物理学报. 2020, 69(8): 080701 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200285>

新型冠状病毒肺炎疫情确诊病例的统计分析及其自回归建模

Statistical analysis and autoregressive modeling of confirmed coronavirus disease 2019 epidemic cases

物理学报. 2020, 69(9): 090203 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200503>

新型冠状病毒肺炎的流行病学参数与模型

Epidemiological parameters and models of coronavirus disease 2019

物理学报. 2020, 69(9): 090202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200389>

预测人类移动行为的介入机会类模型研究进展

Research advances in intervening opportunity class models for predicting human mobility

物理学报. 2020, 69(24): 248901 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201119>

评估新型冠状病毒地区防控效果的一种近似方法

Approximate method to evaluate the regional control efficacy of COVID-19

物理学报. 2020, 69(10): 100201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200441>

基于辟谣机制的时滞谣言传播模型的动力学分析

Dynamic analysis of rumor-spread-delaying model based on rumor-refuting mechanism

物理学报. 2020, 69(2): 020501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191503>

物 理 学 报

第 69 卷 第 24 期 2020 年 12 月

目 次

特邀综述

- 248702 转录机器：绳上舞者 王耀来 刘锋

综述

- 244301 声涡旋信息应用研究进展 郭忠义 刘洪郡 李晶晶 周红平 郭凯 高隽
246101 二维过渡金属硫属化合物相变方法的研究进展 张浩哲 徐春燕 南海燕 肖少庆 顾晓峰
247701 基于压电驻极体的微能量采集 张咪 左西 杨同青 张晓青
248901 预测人类移动行为的介入机会类模型研究进展 刘二见 闫小勇

总论

- 240201 基于连续感染模型的新冠肺炎校园传播与防控策略分析 孙皓宸 刘肖凡 许小可 吴晔
240501 多频正弦混沌细胞神经网络及其复杂动力学特性 李茹依 王光义 董玉姣 周玮
240502 基于深度学习压缩感知与复合混沌系统的通用图像加密算法 陈炜 郭媛 敬世伟
240701 基于多路放大器加法电路噪声抑制的热声成像技术 汤永辉 郑铸 谢实梦 黄林 蒋华北

核物理学

- 242101 混合中子星内强子 - 夸克退禁闭相变 龚武坤 郭文军

电磁学、光学、声学、传热学、经典力学和流体动力学

- 244101 一种编码式低雷达散射截面超表面天线阵列设计 郝彪 杨宾锋 高军 曹祥玉 杨欢欢 李桐
244201 宽带高效聚焦的片上集成纳米透镜 田梓聪 郭遗敏 胡晨岩 王慧琴 路翠翠
244202 偏振成像激光雷达与短波红外复合光学接收系统设计与分析 冯帅 常军 胡瑶瑶 吴昊 刘鑫
244203 基于 Zernike 模型系数优化的椭球型窗口光学系统像差校正
..... 梁殿明 王超 史浩东 刘壮 付强 张肃 战俊彤 余益欣 李英超 姜会林
244204 基于深度学习的联合变换相关器光学图像加密系统去噪方法
..... 郎利影 陆佳磊 于娜娜 席思星 王雪光 张雷 焦小雪
244205 非自治 Kadomtsev-Petviashvili 方程的自相似变换和二维怪波构造 张解放 金美贞 胡文成
244601 磁电弹性材料中含有带四条纳米裂纹的正 $4n$ 边形纳米孔的反平面断裂问题 杨东升 刘官厅
244602 垂直振动水柱中气泡下沉机理
..... 赵小刚 杨浩然 张琪 程琳 张翔宇 王凤龙 段丞博 卓伟 徐春龙 侯兆阳

基于连续感染模型的新冠肺炎校园传播与防控策略分析*

孙皓宸¹⁾ 刘肖凡²⁾ 许小可^{1)†} 吴晔^{3)4)‡}

1) (大连民族大学信息与通信工程学院, 大连 116600)

2) (香港城市大学媒体与传播系, 香港 999077)

3) (北京师范大学, 计算传播学研究中心, 珠海 519085)

4) (北京师范大学新闻传播学院, 北京 100875)

(2020 年 7 月 12 日收到; 2020 年 8 月 9 日收到修改稿)

新冠肺炎疫情在中国平稳后多省已开始复学, 在学校这种封闭式环境中师生长时间接触会增加疫情爆发的可能. 虽然学校停课可以有效地缓解疫情, 但大面积的学生隔离会造成人群恐慌和社会负担, 所以针对校园这一特殊环境需要制定更加科学的防控措施. 本文中根据患病期间新冠肺炎感染个体病毒排出情况重新定义患者的传染能力, 将其引入到传统易感-潜伏-传染-恢复 (SEIR) 模型后提出了更符合新冠肺炎患者实际传播的连续感染模型. 其次, 通过真实接触数据计算学生间有效距离, 提出针对校园的数字接触追踪防控措施. 通过真实在校期间学生接触数据与连续感染模型模拟新冠肺炎在校园中的传播, 从而比较各种防控措施对校园疫情的防控效果, 并且通过施加防控措施时累计隔离人次评估各防控措施带来的社会影响. 结果发现, 相比于传统 SEIR 模型, 新冠肺炎在连续感染模型中会造成更大的病例规模, 在连续感染模型中验证的防控措施更具有说服力. 在校园内采取数字接触追踪防控会在控制隔离人次最少的情况下达到与封闭学校近似的效果. 本文研究有助于学校选取合适的防控措施, 提出的连续感染模型有助于研究人员更准确地仿真新冠肺炎传播.

关键词: 新冠肺炎, 聚集性疫情, 疾病传播, 易感-潜伏-传染-恢复模型

PACS: 02.50.-r, 02.60.Ed, 05.10.-a, 89.75.-k

DOI: 10.7498/aps.69.20201106

1 引言

新冠肺炎疫情在武汉爆发后, 迅速蔓延至全国各地区. 全国人民在抗疫中不懈努力, 各省的病例数量已屈指可数, 国内总体疫情情况已较为平稳^[1]. 随着新冠肺炎疫情在中国的缓和, 多省已经顺利复工、复产和复学. 学生作为家庭和国家的希望, 关

联着家庭的命运和国家的未来, 所以复学后学校是否会出现新冠肺炎大规模爆发不仅是人们关注的热点问题, 也是恢复人民正常生活所需要面临的重要难题.

师生在学校内近距离交流和长时间聚集不但会增加校园疫情爆发的可能, 还会让学校成为病毒在家庭传播的重要来源^[2]. 虽然国内疫情已较为平稳, 但是我们依旧要做好校园疫情的防控准备.

* 国家自然科学基金 (批准号: 61773091, 61603073, 61672108, 11875005, 61672108)、辽宁省“兴辽英才”计划 (批准号: XLYC1807106) 和辽宁省高等学校创新人才支持计划 (批准号: LR2016070) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xuxiaoke@foxmail.com

‡ 通信作者. E-mail: wuyue@bnu.edu.cn

首先, 需要构建传染病模型模拟新冠肺炎在校园的传播, 预测新冠肺炎对学生的感染情况. 虽然很多研究通过传统易感-潜伏-传染-恢复 (SEIR) 模型并考虑潜伏期传染性去仿真新冠肺炎的传播^[3], 但是这些经典传染病数学模型与现实中病毒的传播依旧存在很明显的差别. 近期一篇动物实验论文中指出: 新冠肺炎患者的传染能力并不像经典 SEIR 模型中那样一成不变, 而是在患病期间的病毒排出量会随着被感染天数变化^[4]. 为了让传染病模型更贴近新冠肺炎的传播情况, 拟将患者的传染能力变化引入到传统 SEIR 模型中, 提出新冠肺炎的连续感染模型.

此外, 当新冠肺炎病例在校园内出现时, 需要及时施加有效的防控措施. 目前普遍认为学校停课是缓解校园疫情的最可行措施^[5], 在俄罗斯托姆斯克城市中进行的一项研究表明: 短期关闭学校可以有效地减少感染人数^[6]. 但是学校停课会隔离大量学生, 由于家长和社会对此问题尤为关注, 这样做不仅会引起人群恐慌也会为社会带来经济负担^[7]. 针对此问题, 我们需要制定更加科学有效的防控措施去应对新冠肺炎在学校的传播. 目前研究人员提出一种基于手机应用程序的数字接触追踪防控, 并且验证了该防控措施对疫情扩散具有抑制作用^[8]. 数字接触追踪防控可以迅速地找到新冠肺炎患者的密切接触者并提示其隔离, 在校园疫情防控中该方法可以帮助学校快速准确地定位和隔离与患者有接触史的学生. 考虑到新冠肺炎病毒在学校这种封闭环境下传播速度极快, 该措施对校园疫情的防控效果还不得而知, 需要通过仿真验证该措施的有效性, 并且与封闭学校等隔离区域式防控进行对比.

综上所述, 考虑到复学后新冠肺炎在校园内爆发会对社会造成巨大影响, 需要建立合理的传染病模型对新冠肺炎在校园的传播进行仿真, 并且预测新冠肺炎在校园内对学生的感染情况, 同时也需要提出科学有效的校园疫情防控措施. 首先, 将新冠肺炎患者传染能力的变化情况引入到传统 SEIR 模型后提出连续感染模型, 并且对连续感染模型与阈值感染模型 (传统 SEIR 模型) 中患者的传染能力和新冠肺炎在校园内的传播情况进行对比. 第二, 通过真实高精度的学生接触数据与连续感染模型模拟在不同防控措施下新冠肺炎的传播, 比较数字接触追踪防控、封闭班级、封闭年级和封闭学校的防控效果. 第三, 根据施加防控措施时累计的隔

离学生人次评价各防控措施的优劣. 基于上述措施, 我们发现连续感染模型更贴近新冠肺炎实际传染情况, 相对于 SEIR 等是更加保守和稳妥的仿真模型, 并分析在该模型下的校园疫情情况. 仿真结果说明, 在校园中学生携带装有检测个体接触程序的手机, 通过手机应用程序追踪患者的密切接触者并提示他们隔离, 不仅会取得与封闭学校近似的防控效果, 也会降低被隔离的学生数量.

2 研究数据与传播模型

2.1 校园真实学生接触数据

以往研究中, 研究人员会受到数据收集和存储设备的限制, 仅能通过抽样调查的方式收集人类行动轨迹. 近几年随着互联网的飞速发展, 研究人员已可以获取高分辨率的人际移动轨迹数据, 依此可准确地分析人际接触. 目前手机 GPS 设备^[9]、WiFi 热点接触数据^[10] 以及学生校园卡数据^[11,12] 是获取真实人际接触数据的常用方法. 虽然这些方法能够满足大规模的观测需求, 但只有用户主动使用手机、连接热点和使用校园卡时才会检测, 因此造成收集的数据不准确且不连续. 为了使人际接触数据更连续和更准确, 更好的方法是使用定制的射频标签 (RFID) 或手机蓝牙对用户间的近距离接触进行检测.

本研究使用由公开网站共享的高中真实学生接触数据^[13,14]. 在校期间学生佩戴定制的 RFID 传感器, 以 20 s 的时间分辨率检测并记录学生间的近距离接触^[15]. 该数据包括 329 名学生在为期五天的接触信息, 以 20 s 为一个单位记录学生之间的真实接触. 参与实验的高中共有 4 个年级, 各年级包含的班级数量不同, 共有 9 个班级.

2.2 基于真实接触的拓展数据

虽然 RFID 可以连续准确地检测学生之间的接触, 但是由于设备的限制使得实验只能在短时间内进行^[16,17]. 因为初始数据仅涵盖学生在五天内的接触情况, 所以需要在时间维度上对初始数据进行拓展. 在校期间学生每周的活动都有很强的周期性, 因此对初始数据拓展是科学的、合理的, 且相关研究也运用了此方法^[18].

首先, 考虑到真实数据仅涵盖在校期间学生之间的接触, 并且周六周日中国大多数学校会放假,

所以假设在非上学时间内 (包括周一至周五的非上学时间和周六周日) 学生彼此不存在接触, 但与社区存在较少接触. 具体拓展方案如下:

1) 周一到周五: 对应原始真实数据中第 1 天到第 5 天的学生接触信息. 由于学生在校时间仅为 9 h, 所以可认为在该天的其他时间学生仅与社区保持接触;

2) 周六周日: 学生之间无接触, 但与社区存在少量接触.

在周一至周五的上学时间内病毒通过真实的时序接触网络进行传播, 在周一至周五的非上学时间以及周六和周日中, 引入了固定的社区感染率, 病毒通过社区感染传播给学生, 且在社区中每个人在每 1 s 内被感染的概率相同.

2.3 连续感染模型

传统 SEIR 模型中考虑了患者的潜伏期, 在模型中易感个体会以单位时间传染概率 β 转变为潜伏个体, 潜伏个体会以单位时间传染概率 γ 转变为感染个体^[19]. 由于新冠肺炎患者具有潜伏期以及无症状, 本文使用不考虑个体出生和死亡且具有无症状患者的 SEIR 模型^[20]. 该模型中个体共有五种状态: 易感态 (S)、潜伏态 (E)、有传染性且有症状 (I)、有传染性但无症状 (A)、恢复态 (R). 虽然传统 SEIR 模型考虑了个体的潜伏态, 但该模型中并没有考虑潜伏期传染性以及患者传染能力的变化情况, 这与新冠肺炎的实际传播过程存在偏差, 因此需要对 SEIR 模型进行改进.

最近, 有学者在猕猴身上引入了 SARS-CoV-2 病毒, 研究发现该病毒会在猕猴身上引起类似 COVID-19 的疾病, 并且会出现与人类类似的发病情况. 研究人员在猕猴的实验中发现: 它们在被感染的当天不会排出病毒, 但从被感染后的第 1 天开始病毒排出量会逐渐增加, 并且会在第 4 天到达峰值. 从第 4 天之后病毒排出量会逐渐降低, 在 18 天后将不再排出病毒^[4]. 病毒排出量越高说明患者传染能力越强, 基于年轻猕猴的病毒排出量可以刻画患者的传染能力, 首先需要计算患者被感染期间病毒排出量的平均值 \bar{E} , 计算公式如下:

$$\bar{E} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \log E_t, \quad (1)$$

其中 t 代表被感染后的时间 (天), T 代表被感染期

间具有传染能力的总天数, E_t 表示患者在被感染后的第 t 天时病毒排出量. 因为对数具有可加性, 所以对 E_t 取对数. 通过病毒排出量的平均值可以计算患者每一天的传染率, 计算公式如下:

$$\beta_t = \bar{\beta} \cdot \frac{\log E_t}{\bar{E}}, \quad (2)$$

其中 β_t 表示患者在被感染后第 t 天的传染率, $\bar{\beta}$ 表示患者被感染期间的平均传染率. 虽然传染率可以通过实际 R_0 值除以传染期天数进行计算, 但在新冠肺炎的实际传播过程中, 一般情况下人与人近距离接触才可能被感染. 参照相关研究中的参数设置^[18], 设定患者的平均传染能力为每 20 min 亲密接触才会导致一个人被感染, 所以平均传染率 $\bar{\beta}$ 等于 $8.3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. 通过 (2) 式可以计算出患者每一天的传染率, 具体数值如图 1 连续感染模型曲线所示.

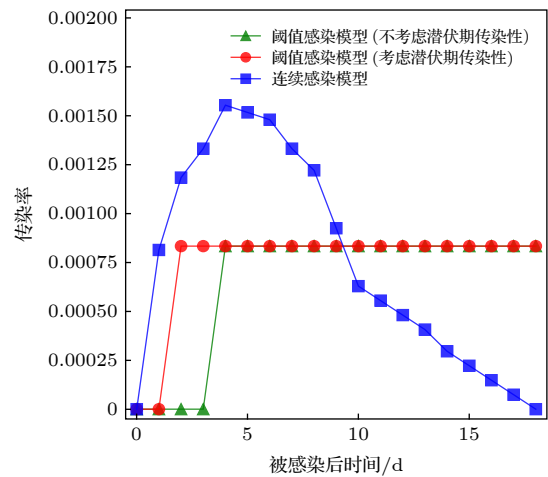


图 1 患者传染率变化曲线

Fig. 1. Curves of patient infection rate.

由于该模型中患者在患病期间的传染能力具有一个连续的变化过程, 所以我们称该模型为连续感染模型. 除传染率连续变化外, 该模型参数值如下:

1) 潜伏期 ($1/\mu$): 4 天. 钟南山团队指出新冠肺炎患者的潜伏期中位数为 4 天^[21];

2) 恢复期 ($1/\gamma$): 10 天. 治愈患者平均住院时间为 10 天左右^[22];

3) 无症状概率: 0.3. 目前无症状患者在各国的显著比例不同, 0.1 到 0.6 均具有可能性^[23,24], 在本文中将无症状患者的概率定义一个各种研究中间的数值为 0.3;

4) 社区感染率 (β_{com}): $8.3 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$.

如上所述, 数据仅仅描述了上学期间学生的接触信息, 而在非上学期间学生依旧有被社区感染的可能. 为简单起见, 假定每一个社区的感染率均相同. 由于学生在社区隔离强度较高, 所以将社区感染率设为一个很低的值.

新冠肺炎患者在潜伏期就具有传染能力, 将传染率变化引入到 SEIR 模型后, 该模型同时考虑了潜伏期传染性和患者传染能力的变化. 病毒在该模型上的传播过程如下:

1) 每当传染性个体与易感个体接触时, 易感个体将以 β 概率转变为潜伏个体. β 由传染性个体被感染的天数决定, 传染性个体包括有症状个体、无症状个体和被感染超过一天的潜伏个体;

2) 潜伏个体度过潜伏期 ($1/\mu$) 之后有出现症状的可能, 有症状 (I) 的概率为 $1 - P(A)$, 无症状 (A) 的概率为 $P(A)$;

3) 有症状个体和无症状个体在经过治愈期 ($1/\gamma$) 后均会变为恢复个体, 恢复个体不具有传染性, 且具有永久免疫力.

3 连续感染模型的仿真与分析

3.1 新冠肺炎患者在不同模型中的传染能力

以上根据新冠肺炎患者病毒排出量提出了连续感染模型, 而传统 SEIR 模型中患者在一个特定时间点之后才具有传染性, 且传染率恒定, 这里称之为阈值感染模型. 为了突出新冠肺炎在连续感染模型中的传播特点, 设置了考虑潜伏期传染性与不考虑潜伏期传染性的阈值感染模型并进行对比.

图 1 显示了患者在三种模型中传染能力变化情况. 在阈值感染模型中患者的传染率恒定为连续感染模型的平均传染率, 即 $8.3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. 在阈值感染模型中如果不考虑潜伏期传染性, 患者在被感染后第 4 天开始具有传染能力, 即潜伏期过后具有传染性. 如果考虑潜伏期个体具有传染性, 患者会从被感染后第 2 天开始具有传染能力, 即潜伏期第 3 天开始具有传染性. 在连续感染模型中患者的传染能力与特定的阈值时间无关, 而与患者病毒排出量有关. 由于患者在被感染后第 1 天开始就会排出病毒, 所以患者在被感染后第 1 天就具有传染性. 被感染后的第 3 天到第 8 天为患者的核心传染期, 患者在该段时间内的传染率明显高于阈值感染

模型中的恒定传染率 (连续感染模型的平均传染率), 并且被感染后第 4 天为患者传染能力的巅峰. 从第 10 天开始连续感染模型中患者的传染率要明显低于阈值感染模型中的恒定传染率, 特别是从被感染后第 14 天开始患者的传染性已经相对较弱, 其传染率甚至要低于阈值感染模型中患者传染率的 $1/3$.

3.2 新冠肺炎在不同模型中的传播情况

从以上分析可发现连续感染模型中患者传染能力变化曲线与其他两种模型存在明显不同. 为了分析这种传染情况对校园疫情的影响, 基于以上三种模型仿真了在无防控措施下新冠肺炎的校园传播, 分别进行了 2000 次仿真以保证结果的可靠性.

在疫情仿真中, 假定有症状个体会在每天结束时被检测和隔离, 且在隔离期不会传播疾病, 而无症状个体无法被检测到 (不施加防控措施也会执行此操作). 每次模拟都会随机选择一个传染性学生和一个完全易感的学生群体, 具有传染性的学生仅设置为有症状个体 (I) 或无症状个体 (A), 有症状 (I) 的概率为 $1 - P(A)$, 无症状 (A) 的概率为 $P(A)$.

图 2 显示了在仅考虑罹患率 (受疾病影响的个体比例) 高于 10% 时, 基于以上三种传染病模型的模拟中感染个体中位数随时间变化情况, 每次模拟中病毒传播均在 329 名 (该高中学生总数) 学生中进行, 模拟的开始时间为第 1 周的星期一. 从图 2 可看出, 病毒在不考虑潜伏期传染性的阈值感染模型中传播速度最慢, 造成的传播规模最小, 即使不施加防控措施, 病例数量的峰值也不会超过 50, 这

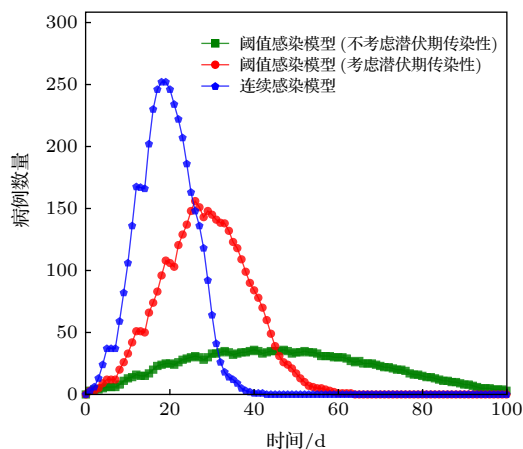


图 2 无封闭措施下的校园疫情情况

Fig. 2. School epidemic situation without closed measures.

是因为该模型中的患者在潜伏期过后才具有传染性, 在仿真中即使不施加大规模防控措施也会在每天结束时将有症状个体隔离, 所以当患者具有传染性且不为无症状时, 其传染天数最多为一天, 这种情况下患者对疫情影响相对较小.

对于考虑潜伏期传染性的阈值感染模型与连续感染模型, 它们的传播规模要远远大于不考虑潜伏期传染性的阈值感染模型. 在这两种模型中病例数量的峰值均大于 150, 这是由于两种模型中的患者在出现症状之前就具有传染性, 而这类患者在每天结束时无法被检测到, 其依旧会在校园传播病毒. 处于潜伏期的患者在连续感染模型中的传染性要强于在阈值感染模型中的传染性, 虽然被感染第 10 天以后患者在阈值感染模型中的传染性更强, 但是此时患者已经出现症状并可以被检测和隔离, 所以病毒在连续感染模型中的传播速度要远远快于在阈值感染模型中的传播速度. 在连续感染模型中, 病例数量在 20 日就会达到峰值, 其峰值大于 250, 并且 2000 次模拟中有 90% 以上的模拟会导致疫情爆发, 每次爆发中均会造成 300 名以上的学生被感染. 上述分析发现, 在连续感染模型中新冠肺炎会造成最大的病例规模且较难防控, 与阈值感染模型相比连续感染模型中患者传染能力更贴近实际情况, 所以基于连续感染模型仿真与分析不同防控措施对校园疫情的影响可认为是更加保险和稳妥的方式.

综上所述, 在连续感染模型与阈值感染模型中, 无论是患者的传染能力还是病毒的传播情况都有明显不同. 由于连续感染模型中的患者传染能力是基于患者病毒排出量定义的, 相比于传统的阈值感染模型, 患者的传染能力会连续变化而非一个恒定的数值, 与新冠肺炎患者的传染能力更加相符. 从仿真结果看, 病毒在连续感染模型中的传播速度要远远快于其他两种模型, 会造成几乎全部的学生被感染. 因此考虑到实际情况, 当新冠肺炎疫情在校园出现时人们往往会低估其传播影响, 如果不施加防控措施疫情将会对学校和社会造成极大的影响.

4 不同防控措施对校园疫情的影响

4.1 基于有效距离的人群隔离式防控

Brockman 和 Helbing^[25] 在 H1N1 和 SARS 研究中发现: 个体之间的病毒传播与地理距离以及欧

氏距离无关, 而与他们之间的有效距离 (effective distance) 有关. 依据此度量方法, 将通过学生之间真实接触情况计算有效距离, 并通过有效距离形象地表现校园内学生活动规律. 首先需要计算两名学生 m 和 n 之间的接触概率 P_{mn} , 计算公式如下:

$$P_{mn} = \frac{I_{mn}}{G_m}, \quad (3)$$

其中 I_{mn} 表示 m 和 n 之间的接触次数, G_m 表示当前学生 m 与其他所有学生接触次数的总和. 通过对接触概率 P_{mn} 取对数, 最终可以计算出有效距离 d_{mn} . 有效距离的计算公式如下:

$$d_{mn} = 1 - \log P_{mn}. \quad (4)$$

图 3 显示了在校期间学生之间的有效距离, x 轴与 y 轴分别对应 329 名学生, 图中坐标 (m, n) 处的值代表学生 m 与学生 n 之间的有效距离, 根据该高中学生所在班级和所在年级的真实分布情况, 将 x 轴与 y 轴中 329 名学生按照班级和年级的顺序进行排列, 每隔 30 多名学生代表一个班级, 例如, 前 36 名学生表示 101 班级, 从第 37 到第 70 的学生表示 102 班级, 每个年级中所包含的班级数量不同, 如三年级仅包含 301 班级, 而一年级和二年级均包含了三个班级. 通过颜色表示学生之间的有效距离, 其映射关系如图 3 中右侧颜色板所示. 从图 3 可以看出, 一个班级的学生之间有效距离最短, 说明在校期间学生大多与本班级同学接触. 因为该高中的班级都分布在学校的不同位置, 各班级之间彼此隔离, 所以在同一年级中不同班级的学生之间有效距离较大. 从全校来看, 大多情况下不同年级的学生之间有效距离较大, 由此可以看出在校期间不同年级的学生接触较少.

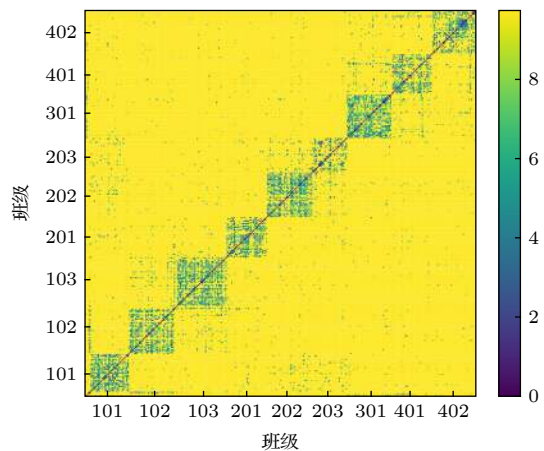


图 3 学生之间有效距离图

Fig. 3. Effective distance between students.

有效距离越小, 病毒越容易传播. 针对图 3 能够得出如下结论: 在同一班级内病毒最容易传播, 而在不同班级或不同年级之间也具有传播病毒的可能, 但相比之下概率较小. 根据以上对学生之间有效距离的分析, 可以提出以下防控措施.

1) 封闭班级: 由于一个班级内学生之间接触最多, 所以当发现有症状个体时, 需要对患者所在班级进行封闭.

2) 封闭年级: 由于同一年级的不同班级学生之间也存在接触, 所以当发现有症状个体时, 需要对患者所在年级进行封闭.

3) 封闭学校: 虽然不同年级的学生之间接触较少, 但依旧存在传播病毒的可能, 所以当发现有症状个体时, 需要对全校进行封闭.

以上提出的三种防控措施均与两个固定参数有关: 封闭时间和封闭触发阈值 (有症状个体的数量). 本文设置封闭时间为 14 天, 封闭触发阈值为 1. 例如: 施加封闭班级措施后, 任何一个班级的有症状个体数大于等于 1 时, 该班级的全部学生将隔离 14 天.

4.2 数字接触追踪精准防控

4.1 节提出的防控措施均属于隔离区域式防控, 该类防控措施是在不知道学生之间具体接触信息的情况下, 将出现患者班级 (年级、学校) 的全部学生隔离. 该类措施是根据学生在校期间活动范围与接触规律提出的, 虽然有很大概率可以将患者的密切接触者隔离, 但该区域内的全部学生不一定都有接触, 所以在施加隔离区域式防控时会导致非密切接触者被隔离.

针对以上问题, 需要提出一种仅隔离密切接触者的防控措施. 从连续感染模型与考虑潜伏期感染的阈值感染模型中可以看出, 新冠肺炎的感染者在出现症状前会存在近 4 天或近 2 天的传染期, 在没有电子设备检测并记录学生之间的接触情况下直接寻找患者在过去几天的密切接触者, 不仅会因为传染期过长导致密切接触者的遗漏, 也会因为寻找时间过长耽误密切接触者的隔离. 此外, 从连续感染模型中也可以看出患者在被感染后的第 1 天就有传染病毒的能力, 如果不能及时找到密切接触者, 密切接触者有很大的概率会变成传染性个体. 针对新冠肺炎患者的传染情况, 需要找到一种能够检测并记录学生之间接触信息的方法, 以防止在寻

找密切接触者时耽误隔离时间.

在文献 [8] 中, 研究人员提出一种基于即时数字接触追踪的防控手段. 该方法通过手机应用程序跟踪个体之间的接触情况, 如果检测到新冠肺炎患者, 它立即向新冠肺炎患者的密切接触者发出自我隔离警示. 虽然该方法已经被证实可以抑制疫情传播, 但在学校这种封闭式聚集空间中该措施的防控效果还不得而知, 所以拟将该方法运用到校园疫情防控中, 并与三种隔离区域式防控措施对比效果. 在学校施加数字追踪防控措施后, 假定每名学生携带装有检测个体接触程序的手机, 当学生之间超过一定距离, 手机应用程序就会记录两名学生之间的接触时间点与接触时长. 一旦发现有症状个体, 该程序可以迅速追踪到患者的密切接触者并要求其进行 14 天的隔离.

对于以上四种防控措施, 被隔离的学生在隔离期与其他学生不存在接触, 但是与社区存在较少接触. 一个学生可以被多次隔离, 即, 如果该学生完成一次隔离返校后又符合隔离条件, 例如班级里有学生感染或与感染者有过接触, 那么他会被再次隔离.

4.3 接触追踪防控措施有效性的检验

针对上述提出的封闭班级、封闭年级、封闭学校和数字接触追踪防控, 分别进行了 2000 次模拟以保证结果的可靠性. 图 4 显示了对于以上四种防控措施, 在仅考虑罹患率高于 10% 的模拟时, 感染个体中位数随时间变化情况, 初始时间为第 1 周的星期一. 与图 2 无封闭措施下的疫情情况相比, 图 4 中每一种防控措施均会缩小感染个体的规模, 感染个体的峰值均不会超过 70. 从 13 日开始病例数量开始下降, 疫情出现好转. 在四种防控措施中, 封闭班级的防控效果较弱, 病例数量的峰值在 60 到 65 之间, 这与不同班级学生之间存在接触有关, 虽然学生之间接触较少, 但被感染后第 1 天就具有传染性且会迅速进入核心传染期的患者会有大概率将病毒传播到不同班级中, 即使封闭了患者班级, 也依旧会遗漏在其他班级的被感染者.

其他三种措施的防控效果近似, 均与封闭班级有较大差别, 病例数量的峰值均不会超过 40. 对于数字接触追踪防控, 虽然连续感染模型中患者在出现症状之前具有大约 4 天的传染期, 但手机应用程序记录的学生接触信息足以将患者近几日的密切

接触者涵盖,一旦在校园内检测到新冠肺炎患者,手机应用程序会立即找出患者在过去的密切接触者并通过手机快速的向他们发出自我隔离警报,缩短了寻找密切接触者与隔离密切接触者的时间.数字接触追踪防控不仅会达到比封闭班级更好的效果,也会达到与封闭学校和封闭年级近似的效果.

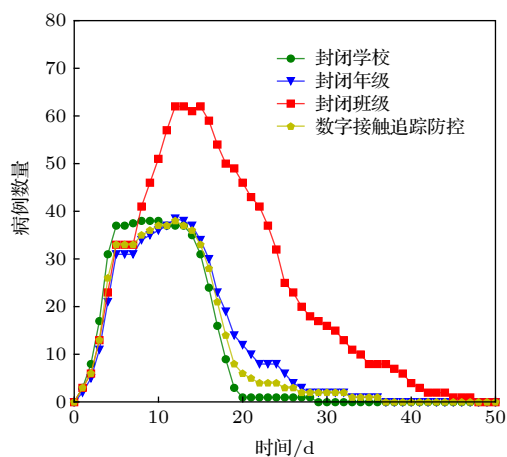


图 4 不同防控措施对校园疫情的影响

Fig. 4. Influence of different prevention and control measures on school epidemic situation.

从以上分析中可以得出每一种防控措施均可以抑制疫情的传播,但在校园疫情防控中不仅要考虑防控效果,也要考虑施加防控措施时所带来的影

响. 防控措施的实施将会对学生进行隔离,而大面积的学生隔离不仅会对学生的学业造成影响,也会为社会带来巨大的经济负担. 所以在具有防控效果的基础上,需要通过每次模拟中累计隔离人次去评价各隔离措施的优劣.

图 5 显示了不同防控措施中累计隔离人次的分布情况,累计隔离人次是通过将每个学生被隔离的次数累加所得. 每当施加封闭学校措施时,在大多情况下只需将学校封闭一次或两次就可以控制疫情发展,但每次封闭都会隔离 329 名学生. 当施加其他三种措施时,大多情况下无需隔离 329 名学生就可以控制疫情发展. 施加封闭年级措施时,累积隔离人次在 100 到 150 之间占比最多,当传染源出现在仅有 1 个班级的 3 年级时,有时仅需要隔离 35 名学生,而当传染源出现在其他年级时,需要隔离的学生数量远远大于 35. 施加封闭班级措施和施加数字接触追踪防控时,多数情况下累计隔离人次小于 50 就可以控制疫情发展.

总体来看,每种防控措施都会出现累计隔离人次过多的情况,特别在封闭年级和封闭学校的模拟中均会出现累计隔离人次大于 329 (学生总数) 的情况. 这是因为累计隔离人次是通过将每名学生被隔离次数累加所得. 在仿真过程中学生不仅会在上学期间被携带病毒的学生感染,也有一定概率在社

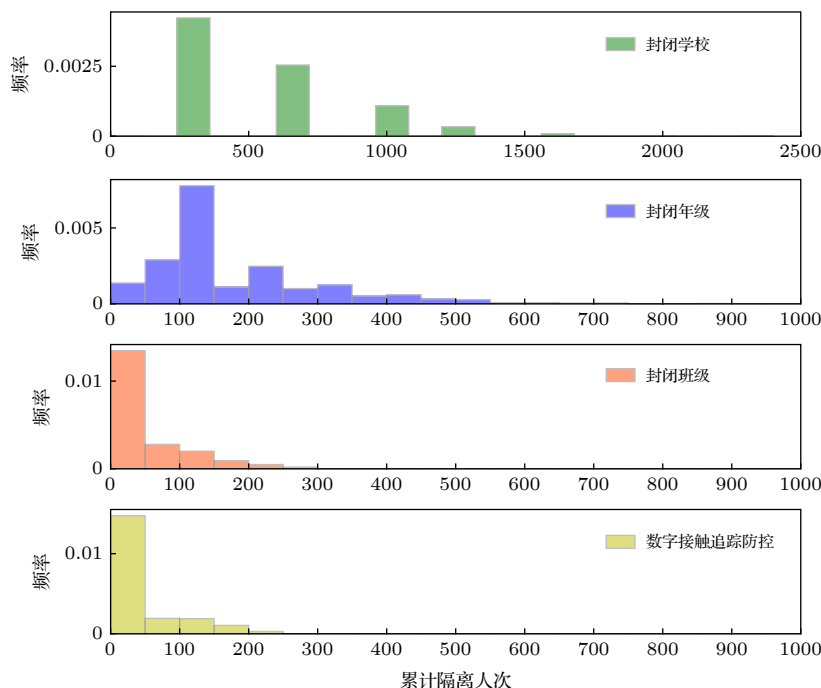


图 5 不同防控措施中累计隔离人次分布情况

Fig. 5. Cumulative quarantine of different prevention and control measures.

区中被感染,如果在14天隔离期内有学生在社区被感染,该类学生将会造成疫情的再次传播.同时,设定每一种防控措施均可以多次实施,所以当社区中被感染的学生出现症状后,每一种防控措施均会被再次实施,虽然在一次封闭中隔离的学生数量小于或等于总人数,但是多次实施防控措施时会将每次封闭中学生隔离的人数累加,从而使累计隔离人次过多甚至超过学生总数329.

图6显示在施加不同防控措施的模拟中病毒传播时间分布情况,病毒传播时间定义为传染源出现到学生中不存在病毒携带者(包括潜伏个体、有症状个体、无症状个体)的这段时间.如图6所示,在每一种防控措施的模拟中病毒传播时间为10天至15天占比最多,因为在仿真模型中患者治愈时间为10天,所以病毒传播时间小于15天说明施加防控措施之后没有学生再被感染,当患者被治愈后病毒也不再传播.封闭班级中病毒传播时间在10—15天的占比相对较低,说明封闭班级会遗漏其他班级的患者,从而导致第1次封闭后病毒依旧会传播.封闭年级、封闭学校、数字接触追踪防控中在10—15天的占比几乎相同.

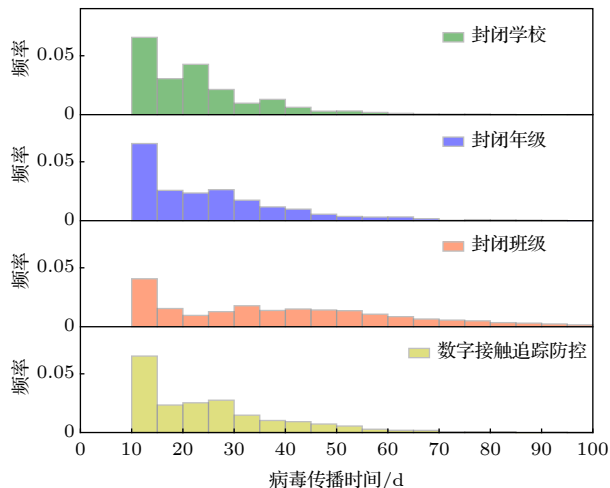


图6 不同防控措施中病毒传播时间分布

Fig. 6. Virus transmission time in different prevention and control measures.

无症状感染者与社区感染率是造成病毒传播时间大于15天的主要原因.当传染源为无法被检测到的无症状感染者时,只能等待被传染源感染的个体经过4天潜伏期出现症状后才会实施防控措施,所以会造成病毒传播时间大于15天.病毒传播时间大于30天甚至60天的情况主要是由社区感染造

成.以封闭学校为例,为期14天的隔离期足以将已存在的患者全部治愈,如果没有学生在社区被感染,病毒也将不再传播,但是如果在社区中有学生被感染,那么病毒随时有可能在学校中出现,因此会导致病毒传播时间过长.该结果说明封闭学校的同时要重视社区中人与人之间的传染,否则封闭学校也不能起到很好的传播阻断作用.

综上所述,无论是隔离区域式的防控措施还是数字接触追踪防控都可以抑制病毒在校园内的传播.从防控效果看,数字接触追踪防控会达到与封闭年级和封闭学校近似的效果;从隔离人次看,数字接触追踪防控会在累计隔离人次最低的情况下控制校园内疫情传播.因此,在校期间需要通过手机检测并记录学生之间的接触情况,当校园内出现疫情时需要及时追踪患者的密切接触者,并将其隔离.在隔离期间需要做好学生的防护工作,避免学生在社区被感染.

5 结 论

本文基于真实高精度的学生接触数据与贴合新冠肺炎实际传播情况的连续感染模型,仿真和分析了新冠肺炎在校园内的传播情况.同时比较了不同防控措施对校园疫情的防控效果,并且基于累计隔离人次评价各防控措施,最后提出了有效的数字追踪防控策略.

首先,根据患者在患病期间病毒排出情况,定义患者在不同时间上的传染能力,将其引入到传统SEIR模型后提出连续感染模型.与传统阈值感染模型相比,该模型更贴近新冠肺炎传播的实际情况.基于该模型的仿真结果显示:如果不施加防控措施,当新冠肺炎患者在学校出现时会导致全部学生被感染.其次,每一种防控措施均可以降低病毒在校园的传播速度和感染个体的规模.数字接触追踪防控不仅会实现与封闭年级和封闭学校近似的效果,也会在控制疫情的同时将累计隔离人次降到最低.

综上所述,随着全国各地复学工作的陆续进行,在防止传染源出现的同时,也要在校园疫情出现之前选取合适的防控措施.最好的措施是在有条件情况下通过手机应用程序检测记录学生之间的接触情况,一旦病毒在校园传播,便可以通过该程序找出患者的密切接触者并及时将其隔离.如果现

阶段学校无法实现数字接触追踪防控,也可以采取封闭年级的方法控制疫情发展,避免采取封闭学校这类极端的措施.同时,对社区内隔离的学生给予关注,隔离结束后对每一位学生进行观察和检测,避免具有传染性的学生进入学校.

参考文献

- [1] Chen D B, Bai W, Wang Y, Wang M, Yu W P, Zhou T 2020 *J. Univ. Electron. Sci. Technol. Chin.* **49** 339 (in Chinese) [陈端兵, 白薇, 王岩, 王敏, 俞伍平, 周涛 2020 电子科技大学学报 **49** 339]
- [2] Viboud C, Boëlle P Y, Cauchemez S, Lavenu A, Valleron A J, Flahault A, Carrat F 2004 *Br. J. Gen. Pract.* **1263** 291
- [3] Sun H C, Xu M D, Xu X K 2020 *J. Univ. Electron. Sci. Technol. Chin.* **49** 399 (in Chinese) [孙皓宸, 徐铭达, 许小可 2020 电子科技大学学报 **49** 399]
- [4] Rockx B, Kuiken T, Herfst S, Bestebroer T, Lamers M M, Oude Munnink B B, Meulder D, Amerongen G, Brand J, Okba N M A, Schipper D, Run P, Leijten L, Sikkema R, Verschoor E, Verstrepen B, Bogers W, Langermans J, Drosten C, Vlisssingen M, Fouchier R, Swart R, Koopmans M, Haagmans B L 2020 *Science* **368** 1012
- [5] Cauchemez S, Ferguson N M, Wachtel C, Tegnell A, Saour G, Duncan B, Nicoll A 2009 *Lancet Infect. Dis.* **9** 473
- [6] Litvinova M, Liu Q H, Kulikov E S, Ajelli M 2019 *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **116** 13174
- [7] Brown S T, Tai J H Y, Bailey R R, Cooley P C, Wheaton W D, Potter M A, Voorhees R E, LeJeune M, Grefenstette J J, Burke D S, McGlone S M, Lee B Y 2011 *BMC Public Health* **11** 353
- [8] Ferretti L, Wymant C, Kendall K, Zhao L, Nurtay A, Abeler-Dörner L, Parker M, Bonsall D, Fraser C 2020 *Science* **368** eabb6936
- [9] Wang R, Chen F L, Chen Z Y, Li T X, Harari G, Tignor S, Zhou X, Ben-Zeev D, Campbell, Andrew T 2014 *Proceedings of the 2014 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing* New York, USA, September 13-17, 2014 p3
- [10] Zhou M Y, Ma M H, Zhang Y K, Sui A K, Pei D, Moscirobroda T 2016 *Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing* New York, USA, September 12-16, 2016 p316
- [11] Cao Y, Gao J, Lian D F, Rong Z H, Ro ng, Shi J T, Wang Q, Wu Y F, Yao H X, Zhou T 2018 *J. R. Soc. Interface* **15** DOI: 10.1098/rsif.2018.0210
- [12] Yao H X, Lian D F, Cao Y, Wu Y F, Zhou T 2019 *ACM Trans. Intell. Syst. Technol.* **10** 1
- [13] The SocioPatterns collaboration <http://www.sociopatterns.org/> [2020-6-11]
- [14] Rossana M, Julie F, Alain B 2015 *PLoS One* **10** e0136497
- [15] Cattuto C, Broeck W V D, Barrat A, Colizza V, Pinton J F, Vespignani A 2010 *PLoS One* **5** e11596
- [16] Li J, Li C, Li X 2019 *Complex Syst. Complexity Sci.* **16** 1 (in Chinese) [李靖, 李聪, 李翔 2019 复杂系统与复杂性科学 **16** 1]
- [17] Liang D, Cui J, Li X 2018 *Chin. J. Comput.* **41** 1598 (in Chinese) [梁迪, 崔靖, 李翔 2018 计算机学报 **41** 1598]
- [18] Gemmetto V, Barrat A, Cattuto C 2014 *BMC Infect. Dis.* **14** 695
- [19] Fan R G, Wang Y B, Luo M, Zhang Y Q, Zhu C P 2020 *J. Univ. Electron. Sci. Technol. Chin.* **49** 369 (in Chinese) [范如国, 王奕博, 罗明, 张应青, 朱超平 2020 电子科技大学学报 **49** 369]
- [20] Anderson R M, Anderson B, May R M 1993 *Immunology Today* (London: Oxford Ford University Press) p616
- [21] Guan W J, Ni Z Y, Hu Y, Liang W H, Ou C Q, He J X, Liu L, Shan H, Lei C L, Hui D, Du B, Li L J, Zeng G, Yuen K Y, Chen R, Tang C L, Wang T, Chen P Y, Xiang J, Li S Y, Wang J L, Liang Z J, Peng Y X, Wei L, Liu Y, Hu Y H, Peng P, Wang J M, Liu J Y, Chen Z, Li G, Zheng Z J, Qiu S Q, Luo J, Ye C J, Zhu S Y, Zhong N S 2020 *N. Engl. J. Med.* **382** 1708
- [22] Wang D W, Hu B, Hu C, Zhu F F, Liu X, Zhang J, Wang B B, Xiang H, Cheng Z S, Xiong Y, Zhao Y, Li Y, Wang X H, Peng Z Y 2020 *JAMA-J. Am. Med. Assoc.* **323** 1061
- [23] Sun W W, Ling F, Pan J R, Cai J, Miao Z P, Liu D L, Cheng W, Chen E F 2020 *Chin. J. Prev. Med.* **54** 625 (in Chinese) [孙琬琬, 凌锋, 潘金仁, 蔡剑, 缪梓萍, 刘社兰, 程伟, 陈恩富 2020 中华预防医学杂志 **54** 625]
- [24] Qiu J *Covert Coronavirus Infections could be Seeding New Outbreaks* <https://www.nature.com/articles/d41586-020-00822-x> [2020-6-11]
- [25] Brockmann D, Helbing D 2013 *Science* **342** 1337

Analysis of COVID-19 spreading and prevention strategy in schools based on continuous infection model*

Sun Hao-Chen¹⁾ Liu Xiao-Fan²⁾ Xu Xiao-Ke^{1)†} Wu Ye^{3)4)‡}

1) (*School of Information and Telecommunication Engineering, Dalian Minzu University, Dalian 116600, China*)

2) (*Department of Media and Communication, City University of Hong Kong, Hongkong 999077, China*)

3) (*Computational Communication Research Center, Beijing Normal University, Zhuhai 519087, China*)

4) (*School of Journalism and Communication, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*)

(Received 12 July 2020; revised manuscript received 9 August 2020)

Abstract

After the COVID-19 epidemic leveled off in China, many provinces have started to resume schooling. Long-term contact between students and teachers in such a closed environment in schooling can increase the possibility of the outbreak. Although the school closure can effectively alleviate the epidemic, large-scale students' isolation not only causes social panic but also brings huge social and economic burden, so before the emergence of school epidemics, one should select and adopt more scientific prevention and control measures. In this study, according to the virus excretion of COVID-19 patients in the disease period, the infectious capacity of patients is redefined. After introducing it into the traditional suspected-exposed-infected-removed (SEIR) model, a continuous infection model that is more consistent with the actual transmission of COVID-19 patients is proposed. Secondly, the effective distance between students is calculated through real contact data. Based on the analysis of the effective distance, three types of isolation area prevention and control measures are proposed and compared with the recently proposed digital contact tracking prevention and control measures. Simulating the spread of COVID-19 in schools through real student contact data and continuous infection models, in order to compare the preventions and control effects of various prevention and control measures in the school epidemic situation, and evaluating the social influence of measures by accumulating the number of quarantines when prevention and control measures are adopted, we find that the COVID-19 can lead the cases to happen on a larger scale in the continuous infection model than in the traditional SEIR model, and the prevention and control measures verified in the continuous infection model are more convincing. Using digital contact tracking prevention and control measures in schools can achieve similar results to those in closed schools with the smallest number of quarantines. The research in this paper can help schools choose appropriate prevention and control measures, and the proposed continuous infection model can help researchers more accurately simulate the spread of COVID-19.

Keywords: COVID-19, cluster outbreak, disease spread, suspected-exposed-infected-removed model

PACS: 02.50.-r, 02.60.Ed, 05.10.-a, 89.75.-k

DOI: 10.7498/aps.69.20201106

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61773091, 61603073, 61672108, 11875005, 61672108), the Liaoning Provincial "Revitalization Talents" Program, China (Grant No. XLYC1807106), and the Program for the Innovative Talents of the Higher Education Institutions of Liaoning Province, China (Grant No. LR2016070).

† Corresponding author. E-mail: xuxiaoke@foxmail.com

‡ Corresponding author. E-mail: wuye@bnu.edu.cn