

境外输入性病例对疫情防控的影响 ——基于SEIDR传染病模型

许静斯^{1,2}, 王子君³, 刘梦洁^{1,4}, 李凉凉⁵, 陈安^{2*}

1. 中国科学院大学, 北京 100049
2. 中国科学院科技战略咨询研究院, 北京 100190
3. 南开大学金融学院, 天津 300350
4. 中国科学院大学中丹学院, 北京 101408
5. 中国人民大学商学院, 北京 100872

摘要 为探究新型冠状病毒肺炎疫情因全球跨境流动带给中国境内疫情防控的影响, 根据经典传染病动力学模型, 提出考虑了境外输入性病例的SEIDR传染病模型。模型将入境人员分为未经海关入境人员和通过海关入境人员, 设计了“境内有疫情, 境外无输入”“境内无疫情, 境外有输入”“境内有疫情, 境外有输入”等3种情形。通过计算各类情形下感染人数峰值和持续的时间范围, 比较不同类型的入境方式对境内疫情的影响和对境内医疗资源造成的压力。根据研究结果, 建议根据疫情风险程度和资源条件采取检测措施; 对未经海关入境的人员严格防控, 对通过海关入境人员进行闭环管理; 动态调整入境隔离措施和隔离期, 在保证境内外疫情防控的提前下逐步恢复国际交流; 整合医疗资源, 提高配置效率, 缓解境内资源占用压力。

关键词 新冠肺炎; 疫情防控; 境外输入; SEIDR模型

2019年末暴发的新冠肺炎疫情由局部暴发逐渐演变为世界大流行, 据约翰霍普金斯大学最新数据显示, 截至2022年2月26日, 新冠肺炎疫情已经造成全球超过4亿3330万人感染, 累计超过593万

人死亡^[1]。中国经过一系列严密的防控措施, 国内疫情逐渐好转。与此同时, 境外多个国家和地区的疫情传染形势日益严峻, 境外输入风险持续增加, 境外输入病例成为当前疫情防控的重点。2020年

收稿日期: 2021-07-14; 修回日期: 2022-04-29

基金项目: 国家社会科学基金重点项目(19AZD019); 国家语言文字工作委员会“十三五”科研规划重点项目(ZD1135-119)

作者简介: 许静斯, 硕士研究生, 研究方向为风险与应急管理, 电子信箱: xujingsi19@mails.ucas.ac.cn; 陈安(通信作者), 研究员, 研究方向为现代应急管理、智库理论与方法, 电子信箱: anchen@casisd.cn

引用格式: 许静斯, 王子君, 刘梦洁, 等. 境外输入性病例对疫情防控的影响——基于SEIDR传染病模型[J]. 科技导报, 2022, 40(9): 40-52; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2022.09.005

2月26日,全国出现首个境外输入的确诊病例。随后,随着境外疫情愈演愈烈,海外华裔、留学生、旅居人员等纷纷回国,境外输入病例与日俱增,导致国内的疫情防控压力开始加大。2020年3月13日,新增境外输入病例数首次超过本土新增病例数。2020年3月21日,广东省出现了首个被境外输入人员感染的本地病例,随后北京、上海、浙江等地也相继出现了境外输入的关联病例。截至2022年2月26日,境外输入病例来源国家或地区前10为缅甸、俄罗斯、美国、中国香港、英国、菲律宾、阿联酋、法国、日本、加拿大。境外输入累计确诊病例最多的省级行政区为上海市、广东省、云南省、四川省、福建省、陕西省、北京市、黑龙江省、山东省、浙江省(图1)。由于世界各国严峻的疫情形势,境外输入病例增多,中国境内本土疫情也呈现散发的态势^[2]。截至2022年2月26日,从境外输入的确诊病例已达14065例^[3],在疫情防控新常态下,全国严格遵循“外防输入,内防反弹”的工作策略,但境外疫情防控压力持续增加。

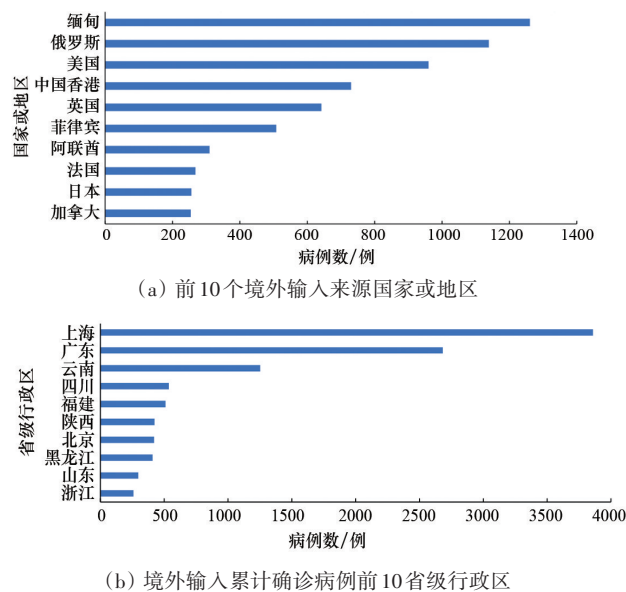


图1 境外输入病例来源国家或地区与输入省级行政区统计

自新冠肺炎疫情暴发后,飞机场等公共场所成为了重点防控单位^[4],国际物流运输和出入境人员均受到严格的卫生检疫措施^[5]。2021年下半年,国内多起本土疫情与境外输入性病例相关。2021年

12月13日,天津市确认从入境人员中首次发现新冠病毒奥密克戎变异株,全国多省对输入性病例提高了防控水平,对境外人员的防控措施最长达到21天(集中隔离)加7天(居家监测)^[6]。考虑到国外疫情形势依然严峻,新冠肺炎病毒仍在不断传播和变异,目前的入境政策坚持“外防输入”的原则。在新冠肺炎背景下,国际贸易和投资受到阻碍、产业链和供应链发展不畅、国际政治冲突不断、全球发展不平等加剧^[7]。长期实施高度管控的入境政策不利于维持全球化的发展成果、促进全球经济复苏和推动国际文化交流。

入境管控措施需要根据病毒自身的病原学特点、境内外疫情发展的现实情况、人员流动趋势、管控措施带来的成本与收益等因素进行调整。因此,本文重在研究不同类型的境外输入性病例对境内疫情发展的影响程度以及隔离期为不同天数造成的疫情发展结果差异,以期为入境管控政策的制定提供参考与借鉴。

当前,研究人员对新冠肺炎疫情防控的研究主要集中在流行病学调查研究和采用数学建模预测来进行疾病预防等方面。

在流行病学研究中,有研究人员分析了特定地区的境外输入性病例的情况,为制定本地区的疫情防控策略和措施提供了科学依据。胡敏等^[8]收集了2020年2月28日至11月30日成都市入境航班及境外输入病例相关信息,采用EpidataManager、WPS2019和R4.0.3进行数据管理和统计分析,发现成都市境外输入病例较多,病例大多症状轻微,多来自非洲和亚洲国家(或地区),加强入境口岸筛查和密切接触筛查对控制成都市乃至全国疫情都具有重要意义。戚小华等^[9]调查发现2020年9月1日至2021年1月28日,浙江省境外输入病例引起了当地疫情的散发态势,输入性病例主要来自菲律宾,以无症状感染者居多,职业以商业服务人员为主。该研究建议对口岸入境人员加强核酸检测、采取隔离医学观察等措施以防止境外输入病例引起的本地疫情传播。

在传染病模型研究中,大量研究人员收集了传染病疫情的相关数据,并运用数学建模预测未来疫

情发展情况以对疫情防控提供对策和建议。早期 Bernoulli^[10]建立数学模型对天花病毒的传播进行研究。20 世纪 20 年代初, Kermack 和 McKendrick^[11]建立了 SIR 仓室模型, 研究 17 世纪在伦敦流行的黑死病。此后又有许多仓室模型相继出现, 如 SI、SIS、SEIR、SIRS、SEIRS^[12-16]等。在本次新冠肺炎疫情中, 范如国等^[17-19]应用 SEIR 传染病模型模拟了不同潜伏期对应的武汉市确诊病例峰值。为了预测美国的疫情传播趋势和医疗资源需求以支持疫情防控政策, Yarsky^[20]基于修正的 SEIR 模型, 为美国不同的州构建了多个 SEIR+AQ 模型, 并对哥伦比亚特区 (DC) 实施有限的社交隔离政策与佐治亚州 (GA) 不实施任何社交隔离政策进行案例对比, 预测结果表明, 采取遏制策略有利于华盛顿特区恢复经济活动; 在采取放宽社会隔离令后的短时间内, 住院人数会急剧增加。王志心等^[21]将传染病模型 SIR 与机器学习方法结合, 评估了中国重要省市疫情的严重程度, 并预测了最终确诊人数。刘昌孝等^[22]提出简化的“传播相”和“处置相”的“二房室”模型, 并基于国内和国际疫情数据予以分析。通过对比分析认为, 处理好传播途径和控制传播速率是疫情防控的关键。罗丹婷等^[23]基于常规粒子群算法, 提出了一种采用自适应权重的常规粒子群 (particle swarm optimization, PSO) 算法, 对 SEIR 改进模型的关键参数进行反演计算, 分析并评估疫情控制中的有效策略及所占比例。Yang 等^[24]通过修正 SEIR 结合训练的人工智能 (AI) 方法, 评估了政府的管控措施并对疫情发展趋势进行了预测。为了模拟传染病在城市地区的传播, Qian 等^[25]将传染病模型与城市人口流动相结合, 构建了空间 SEIR 模型。根据该模型的理论性质研究提出了资源有限条件下城市交通系统的最优入口控制策略。通过对新冠肺炎疫情暴发期间纽约市内旅行和活動造成的接触传染展开案例研究, 控制策略的实际有效性得到论证。Li 等^[26]考虑到潜伏期和无症状感染, 建立 SEIAR 模型验证了一些典型措施对疫情的抑制效果, 例如提高人们的防范意识, 减少社会接触。研究发现, 在不同的流行阶段实施相应的防疫措施可以较低的成本取得明显的效果。在疫情初

期, 全球封锁政策是必要的, 但随着形势的缓和, 隔离受感染的病房和中心枢纽可能更有利。

总结上述研究, 流行病学调查方法广泛应用于境内疫情研究, 对于区域性乃至全国性境外输入病例的研究有所欠缺。SEIR 模型被广泛应用于新冠肺炎疫情防控预测与对策制定中, 能够从全局分析和模拟此次新冠肺炎疫情, 有利于为科学防控疫情提供数据和理论支持。当前, 疫情防控处于新常态下, 全国范围内采取“内防反弹、外防输入”的防控政策。学界针对境外输入的相关研究内容较少, 尤其是全国范围内的数学建模与评估、预测境外输入病例对当前疫情防控的影响因素和效率的研究不足。本研究基于经典的 SEIR 模型, 提出了改进的 SEIDR 模型, 并基于小世界网络与平均场理论, 得到关于不同入境方式对境内疫情传播影响的动力学模型。分别对 3 种情况: 境内有疫情, 无入境人员; 境内无疫情, 仅有境外输入病例; 境内有疫情且面临境外输入的情况进行仿真实验, 通过对中国目前新型冠状病毒境外输入的情况进行分析, 以期为后续的防控工作提供借鉴。

1 SEIDR 传染病动力学模型

1.1 模型构建的现实背景

自 2019 年底新冠肺炎疫情暴发至 2022 年 2 月 26 日, 中国境内疫情主要经历了 3 个阶段。第 1 个阶段从 2019 年底至 2020 年 2 月, 全国新冠肺炎疫情的发展以境内本土病例为主。直到 2020 年 2 月 26 日宁夏出现第 1 例境外输入病例。第 2 个阶段为 2020 年 3 月至 4 月“内防反弹, 外防输入”的阶段, 除湖北省外, 其他省份基本无本土新增病例, 湖北省也在 3 月 18 日出现首次“零新增”。这一阶段每日境外输入病例逐渐超过本土病例, 病毒通过入境人员或冷链物流进行传播, 导致境内疫情出现散发。第 3 个阶段为 2020 年 5 月之后进入常态化疫情防控阶段, 境内疫情和境外输入持续但尚未出现严重反弹的情况 (图 2)。

为研究入境人员对现阶段疫情防控的影响, 采用数值仿真实验模拟不同入境方式对境内疫情的

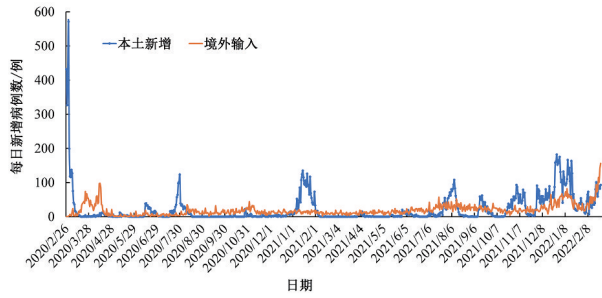


图2 2020年以来每日本土新增与境外输入病例数对比

具体影响,并设置入境隔离期为3~21 d,分别计算不同条件下的资源占用总量。

1.2 模型基本假设

基于经典传染病模型,将人群分为易感者 S ,暴露者 E ,感染者 I ,在医院进行治疗者 D ,治愈者 R ,研究提出SEIDR模型。根据中国境内的疫情救治和防控策略,重点考虑了暴露者和感染者之间的检出率差异以及住院者和感染者之间的恢复率和自愈率差异。

模型设定的主要规则为:在 t 时刻,病毒以标准发生率通过易感者 S_h 与暴露者 E_h 和感染者 I_h 的接触进行传播, S_h 进入 E_h 仓室,接触率分别为 β_1 和 β_2 ;在 σ_1 检出率下,暴露者 E_h 经过病毒检测结果呈阳性将被送至医院进行治疗,即进入 D_h 仓室,经过潜伏期的暴露者则成为感染者 I_h 在 σ_2 检出率下,感染者 I_h 被检测后送至医院。

境内人员与入境人员采用下标 h 和 v 进行区分。 λ_1 和 λ_2 分别表示 D_h 和 I_h 的恢复率(含治愈率和病死率)和自愈率。

根据目前中国的入境政策和入境人员筛查情况,将入境方式分为未经检测入境和规范检测入境。

(1) 未经检测入境人员未经过海关的报备和卫生检测直接入境, S_{v_1} 、 E_{v_1} 、 R_{v_1} 、 I_{v_1} 分别直接加入 S_h 、 E_h 、 I_h 、 R_h 。(2) 规范检测入境人员接受严格的审查和检测后, S_{v_2} 、 R_{v_2} 进行集中隔离,隔离期 p 满后入境,届时分别直接加入 S_h 、 R_h 。潜伏期不超过隔离期的暴露者 E_{v_2} 和感染者 I_{v_2} 被识别出携带病毒,直接送往定点医院进行治疗,进入 D_h 仓室。而潜伏期超过隔离期的暴露者经过隔离期后入境,直接成为境内感染者,进入仓室 I_h 。假设入境人员的潜伏期 t_v 服从Gamma分布^[27],即 $t_v \sim \Gamma(\alpha, \beta)$,则 $\tau E_{v_2} = E_{v_2} P(t_v > t) = E_{v_2} [1 - P(t_v < t)] = E_{v_2} \int_0^t f(u; \alpha, \beta) du$ 。其中 f 为Gamma分布的概率密度函数, $f(x; \alpha, \beta) = \frac{\beta^\alpha x^{\alpha-1} e^{-\beta x}}{(\alpha-1)!}$ 。

基于以上假设,病毒传播流程如图3所示。其中, $\beta_1 S_h E_h$ 和 $\beta_2 S_h I_h$ 分别表示单位时间境内易感者接触暴露者或感染者被传染的人数; $\sigma_1 E_h$ 表示被检出携带病毒,送至医院的暴露者人数; $[(1-\sigma_1)/q] E_h$ 表示暴露者经过潜伏期成为感染者; $\sigma_2 I_h$ 为送至医院进行治疗的感染者人数; $\lambda_1 D_h$ 和 $\lambda_2 I_h$ 分别是在医院治愈或自愈后的治愈者数量; τE_{v_2} 为通过海关入

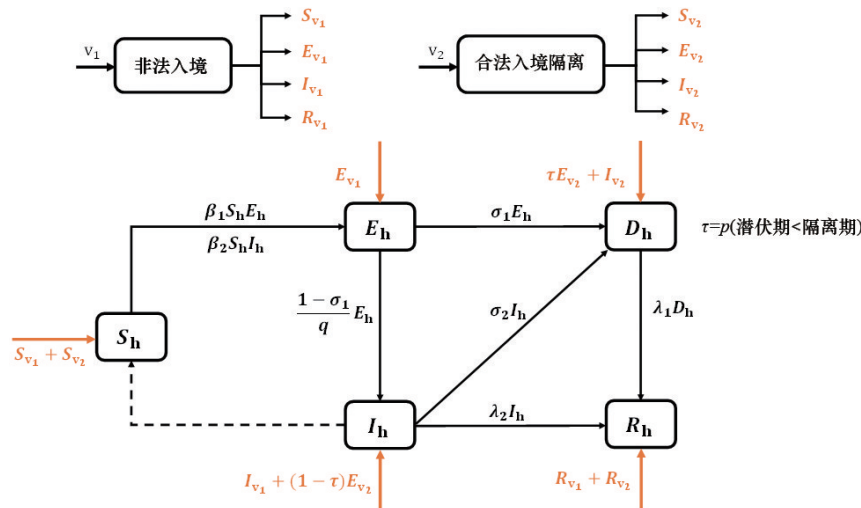


图3 小世界网络下 S_h 、 E_h 、 I_h 、 D_h 、 R_h 各仓之间的转换关系

境人员中潜伏期超过隔离期的暴露者。

1.3 模型平均场方程

复杂网络是由数量巨大的节点和节点之间错综复杂的关系共同构成的网络结构,包括小世界网络和无标度网络。小世界网络为均匀网络,无标度网络为异质网络。Watts 和 Strogatz^[28]于 1998 年提出了一种特殊的复杂网络,其特征是具备高集聚系数和低平均路径长度,被称作瓦茨-斯特罗加茨模型(WS 模型),这是最典型的小世界网络模型。随后,Newman 和 Watts^[29]又提出了纽曼-瓦茨模型(NW 模型),是以概率 P 在随机选取的 2 个节点之间连边。当概率 P 足够小,节点数 N 足够大时,2 种模型在本质上一致。

利用小世界网络模拟传染病在现实社会网络的传播研究已经非常丰富^[30-32],因此本研究的底层传播网络采用了 WS 小世界网络,更加符合实际网络的情况。采用 Python3.6 构建一个最近邻耦合网

络,节点总数 N 为 5000,其中网络中每个节点连接它两边相邻的各 3 个节点,以概率 $P=0.4$ 随机地重新连接网络中的每条边。基于平均场理论,小世界网络下疫情传播平均场方程组为:

$$\frac{dS_h}{dt} = S_{v_1} + S_{v_2} - \frac{\beta_1 \langle k \rangle S_h E_h + \beta_2 \langle k \rangle S_h I_h}{N_h} \quad (1)$$

$$\frac{dE_h}{dt} = E_{v_1} + \frac{\beta_1 \langle k \rangle S_h E_h + \beta_2 \langle k \rangle S_h I_h}{N_h} - \frac{(1 - \sigma_1)}{q} E_h - \sigma_1 E_h \quad (2)$$

$$\frac{dI_h}{dt} = I_{v_1} + (1 - \tau) E_{v_2} + \frac{(1 - \sigma_1)}{q} E_h - \sigma_2 I_h - \lambda_2 D_h \quad (3)$$

$$\frac{dD_h}{dt} = \tau E_{v_2} + I_{v_2} + \sigma_1 E_h + \sigma_2 I_h - \lambda_1 D_h \quad (4)$$

$$\frac{dR_h}{dt} = R_{v_1} + R_{v_2} + \lambda_1 D_h + \lambda_2 I_h \quad (5)$$

模型中各参数意义如表 1 所示。

表 1 模型参数含义及设定

参数	描述	参数取值	参考文献
β_1	暴露者对易感者的感染系数	0.07	[33]
β_2	感染者对易感者的感染系数	0.052	[33]
σ_1	暴露者的检出率	0.1	[23]
σ_2	感染者的检出率	0.2	[23]
p	入境人员的隔离期	14 d	[34]
q	境内暴露者出现临床症状的潜伏期	5 d	[35]
t_v	入境人员的潜伏期	$t_v \sim \Gamma(\alpha, \beta)$	[27]
λ_1	在医院接受治疗者的恢复率	0.07	[36]
λ_2	感染者的自愈率	0.069	[36]

在疫情期间,每天都有一定数量人员通过海、陆、空口岸入境中国,但数量受到入境政策和航班熔断机制的影响。同时不断有一定数量人员未通过正常途径入境,据国家移民管理局报告,2020 年查获非法出入境人员 8.9 万人次^[37]。因此建立周期性脉冲模型,每天加入固定入境人数,在一定程度上模拟中国的入境情况。

$$R_h(t^+) = R_h(t) + R_{v_1} + R_{v_2} D_h(t) \quad (6)$$

$$D_h(t^+) = D_h(t) + I_{v_2} + \tau E_{v_2} I_h(t) \quad (7)$$

$$I_h(t^+) = I_h(t) + I_{v_1} + (1 - \tau) E_{v_2} E_h(t) \quad (8)$$

$$E_h(t^+) = E_h(t) + E_{v_1} S_h(t) \quad (9)$$

$$S_h(t^+) = S_h(t) + S_{v_1} + S_{v_2} \quad (10)$$

1.4 基本再生数 R_0 与无病平衡点证明

在境外入境者持续输入的情况下,暴露者和感染者入境导致境内疫情不存在无病平衡状态。以下计算无境外输入情况下的基本再生数,证明无病平衡点的存在性。

$$\frac{dS_h}{dt} = -\frac{\beta_1 \langle k \rangle S_h E_h}{N_h} - \frac{\beta_2 \langle k \rangle S_h I_h}{N_h} \quad (11)$$

$$\frac{dE_h}{dt} = -\frac{\beta_1 \langle k \rangle S_h E_h}{N_h} + \frac{\beta_2 \langle k \rangle S_h I_h}{N_h} - \frac{(1 - \sigma_1)}{q} E_h - \sigma_1 E_h \quad (12)$$

$$\frac{dI_h}{dt} = \frac{(1 - \sigma_1)}{q} E_h - \sigma_2 I_h - \lambda_2 I_h \quad (13)$$

$$\frac{dD_h}{dt} = \sigma_1 E_h + \sigma_2 I_h - \lambda_1 D_h \quad (14)$$

$$\frac{dR_h}{dt} = \lambda_1 D_h + \lambda_2 I_h \quad (15)$$

根据下一代矩阵方法,令 $x \in R^n$ 表示各疾病仓室的人数, i 表示第 i 个疾病仓室, $y \in R^n$ 表示各无病仓室的人数, j 表示第 j 个无病仓室。记 F_i 表示第 i 个疾病仓室中发生继发性感染的增加率, $V_i = V_i^- - V_i^+$ 表示第 i 个疾病仓室的疾病进展。 V_i^- 表示第 i 个仓室的移除率, V_i^+ 表示其他方式转入到 i 仓室的变化率,模型可表达为:

$$x'_i = F_i(x, y) - V_i(x, y) \quad (16)$$

$$y'_j = g_j(x, y) \quad (17)$$

$$\text{令 } X = \begin{bmatrix} E_h(t) \\ I_h(t) \\ D_h(t) \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} S_h(t) \\ R_h(t) \end{bmatrix}, \text{ 故有}$$

$$\begin{aligned} X &= F_{EID}(E_h, I_h, D_h) + V_{EID}(E_h, I_h, D_h) \\ &= \begin{bmatrix} \frac{\beta_1 \langle k \rangle S_h E_h}{N_h} + \frac{\beta_2 \langle k \rangle S_h I_h}{N_h} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1 - \sigma_1}{q} E_h \\ -\frac{1 - \sigma_1}{q} E_h + \sigma_2 I_h + \lambda_2 I_h \\ -\sigma_1 E_h - \sigma_2 I_h + \lambda_1 D_h \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} F(E_h, I_h, D_h) &= \text{Jacobian}(F_{EID}(E_h, I_h, D_h)) \\ &= \begin{bmatrix} \frac{\beta_1 \langle k \rangle S_h}{N_h} & \frac{\beta_2 \langle k \rangle S_h}{N_h} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} V(E_h, I_h, D_h) &= \text{Jacobian}(V_{EID}(E_h, I_h, D_h)) \\ &= \begin{bmatrix} \frac{1 - \sigma_1}{q} + \sigma_1 & 0 & 0 \\ -\frac{1 - \sigma_1}{q} & \sigma_2 + \lambda_2 & 0 \\ -\sigma_1 & -\sigma_2 & \lambda_1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} FV^{-1} &= \begin{bmatrix} \frac{S_h}{N_h(q\sigma_1 - \sigma_1 + 1)} \left(\beta_1 \langle k \rangle q - \frac{\beta_2 \langle k \rangle (\sigma_1 - 1)}{\lambda_1 + \lambda_2} \right) & 0 & 0 \\ \frac{S_h \beta_2 \langle k \rangle}{N_h(\lambda_2 + \sigma_2)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad (21)$$

基本再生数 $R_0 = \rho(FV^{-1})$

$$\begin{aligned} R_0 &= [S_h \beta_2 \langle k \rangle - S_h \beta_2 \langle k \rangle \sigma_1 + S_h \beta_1 \langle k \rangle \lambda_2 q + \\ & S_h \beta_1 \langle k \rangle q \sigma_2] / [N_h \lambda_2 + N_h \sigma_2 - N_h \lambda_2 \sigma_1 - \\ & N_h \sigma_1 \sigma_2 + N_h q \sigma_1 \sigma_2 + N_h \lambda_2 q \sigma_1] \end{aligned} \quad (22)$$

带入疾病初始稳态条件, $S_h = N_h$, 可得

$$\begin{aligned} R_0 &= \frac{\beta_2 \langle k \rangle - \beta_2 \langle k \rangle \sigma_1 + \beta_1 \langle k \rangle \lambda_2 q + \beta_1 \langle k \rangle q \sigma_2}{\lambda_2 + \sigma_2 - \lambda_2 \sigma_1 - \sigma_1 \sigma_2 + q \sigma_1 \sigma_2 + \lambda_2 q \sigma_1} \end{aligned} \quad (23)$$

微分方程组的无病平衡点为 $E_0 = (1, 0, 0, 0, 0)$ 。当 $R_0 < 1$, 无病平衡点 E_0 稳定; 当 $R_0 \geq 1$, E_0 不稳定且最终达到地方病稳定点 $E = (0, 0, 0, 0, 1)$ 。从式(23)可以看出在该模型中 R_0 与各参数均相关, 推导可得 R_0 与参数 $\beta_1, \beta_2, \langle k \rangle$ 呈正相关。当 $q \geq 1$, R_0 与 σ_1 呈负相关关系; 而 $q < 1$, R_0 与 σ_1 为正相关关系。由于新冠肺炎病毒具有潜伏期^[38], 假设 $q \geq 1$, 所以在模型中 R_0 与 σ_1 为负相关。

2 数值仿真与结果分析

为比较未经海关入境和通过海关入境 2 种方式对境内疫情发展的影响进行数值仿真实验。在设置不同的入境隔离期条件下, 比较资源占用总量的变化。为排除境内疫情本身带来的影响, 首先对没有境外输入情况下的境内疫情进行仿真。为避免小概率事件影响实验结果真实性, 以下所有实

验都进行 50 次重复实验,对实验结果取均值进行分析,图 4、图 5、图 6 阴影部分表示 95% 置信区间,

并且对小数采取进 1 取整处理。

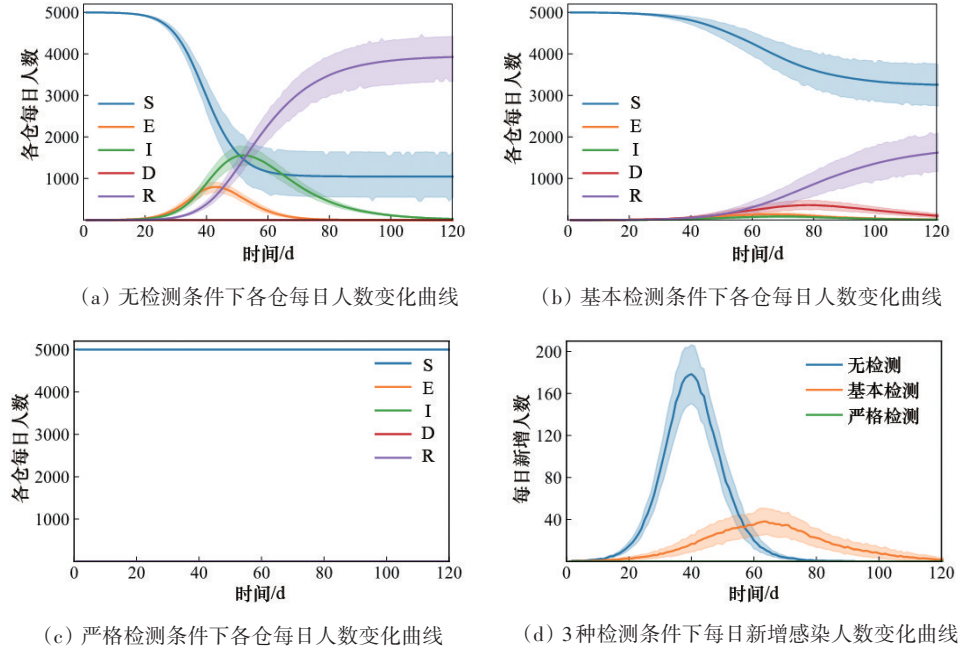


图4 无检测、基本检测和严格检测条件下的境内疫情

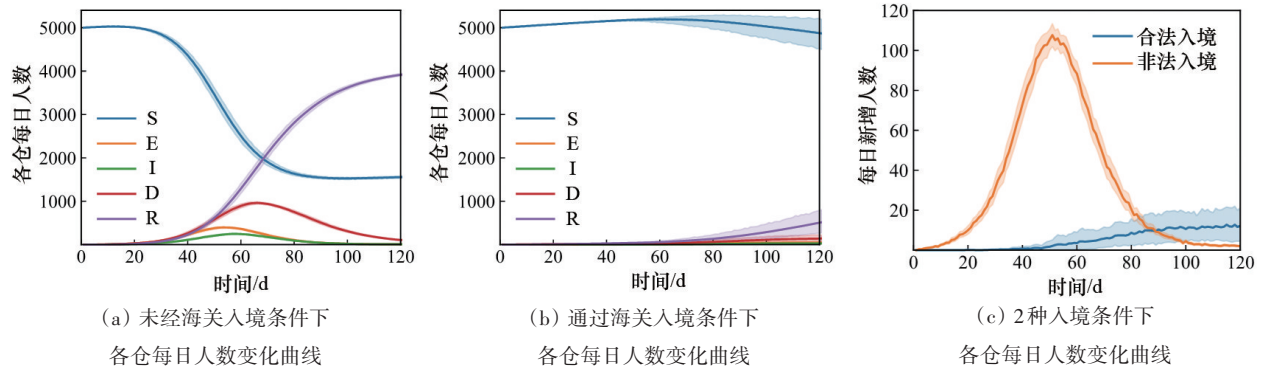


图5 未经海关入境和通过海关入境条件下的境内疫情

2.1 境内有疫情,境外无输入

设定初始值 N_0 为 5000, I_0 为 $1^{[39]}$, 进行为期 120 d 的模拟, 求解易感者 S、暴露者 E、感染者 I、在医院进行治疗者 D 和治愈者 R 等 5 类人群数量的变化趋势, 绘制趋势图。考虑到政府对新冠肺炎的检测措施和隔离措施随着疫情发展会进行相应调整, 则通过调整暴露者 E_0 的检出率 σ_1 和感染者 I_0 检出率 σ_2 , 来反映在没有检测措施、一般严格的检测措施和严格的检测措施 3 种条件下, 各仓人数的每日变化及疫情最终的发展情况。

图 4(a)、(b)、(c) 分别为无检测措施 ($\sigma_1=0, \sigma_2=0$)、基本检测措施 ($\sigma_1=0.1, \sigma_2=0.2$) 和严格检测措施 ($\sigma_1=0.5, \sigma_2=0.6$) 条件下的疫情发展结果。根据仿真结果可以发现, 在没有进行检测措施的情况下, 易感者人数从第 20 d 开始急剧下降, 暴露者和感染者迅速增加, 分别于第 42 d 和第 51 d 达到峰值。随着感染者自愈(或死亡), 恢复者数量逐渐上升, 形成群体免疫屏障^[40], R_0 开始小于 1, 疫情传播速度下降。采取基本检测措施后, 从第 30 d 起暴露者人数显著增加, 并且暴露者和感染者在第 70 d 左

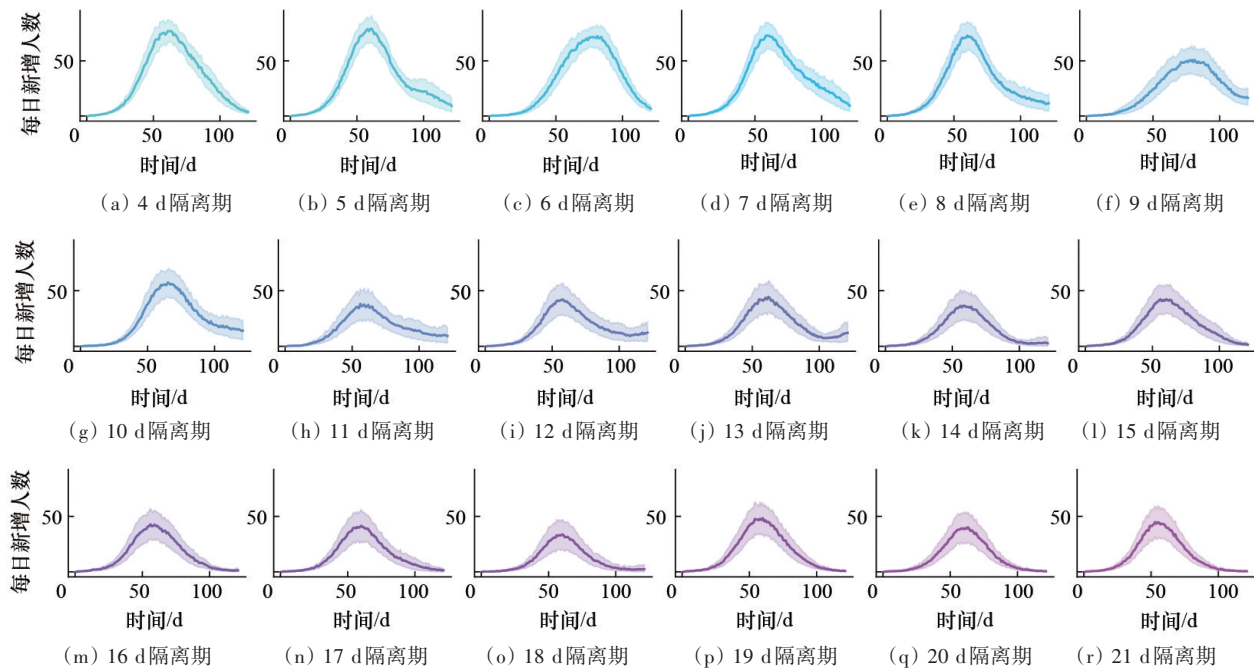


图6 隔离期4~21 d条件下境内每日本土新增被感染者数量

右出现较平稳的峰值,最终累计感染人数显著少于无检测的情况。在严格检测措施条件下,病毒传播的途径被有效阻断,仅有2人感染。

图4(d)统计了3种检测条件下境内暴露者每日新增人数,即被病毒感染的易感者数量,对比发现没有检测措施时的每日新增暴露者在第39 d达到峰值179人,约占境内总人数的3.6%,最终累计感染3953人。采取基本检测措施后,感染高峰推迟到了第62 d,当日新增39名易感者,最终累计感染1742人。

2.2 境内无疫情,境外有输入

设定初始值 N_0 为5000, I_0 为0,境内采取基本检测措施($\sigma_1=0.1, \sigma_2=0.2$),进行为期120 d、脉冲输入周期为2 d的模拟。为了更准确地预测2种入境方式对境内疫情发展的影响,分别模拟只有未经海关入境和只有通过海关入境2种情况,且两者数量一致有利于对比分析。

对于未经海关入境的情况,假设每天有10名未经海关入境人员,其中 $E_{v_1}=1, I_{v_1}=1$ 。对于通过海关入境的方式,假设每天有10名通过海关入境人员,其中 $E_{v_2}=1, I_{v_2}=1$ 。自2020年3月起,北京市、安徽省、山东省等省(市)对所有的入境人员进

行14 d的集中隔离医学观察^[31],因此将隔离期设置为14 d。

结果显示,未经海关入境人员给境内疫情造成的影响较大(图5(a))。在0~19 d,由于持续有人员未经海关入境,境内总人数不断增加,易感者人数也有所上升,达到最高值5029人。从第20 d开始易感者的数量急剧下降,第90 d左右趋于稳定,最低值为1526人。暴露者人数从第一个周期开始逐渐增长,于第52 d达到397人后逐渐下降并回落到10人以内。感染者总人数则在第57 d达到峰值为250人。住院者人数上升速度较快,在第50 d超过了前2个仓室之和,第65 d达到峰值963人。由于感染者和暴露者不断自愈和被治愈,恢复者人数也不断增加并于第68 d超过现存易感者数量,最终达到3923人。

通过海关入境的群体对境内疫情产生的影响较弱(图5(b))。由于境外输入病例中易感者比例高,且易感者和感染者比例低,导致疫情传播慢,易感者人数总体呈上升趋势,第59 d达到5194人,随后逐渐下降至4867人。暴露者和感染者增长不明显,分别第60 d和第70 d开始快速增长,累计暴露者2214人,感染者1292人。整体来看疫情传播

的规模减小了,感染峰值也大大延迟。

2种入境方式分别对境内疫情造成的影响差异显著(图5(c))。未经海关入境人员脉冲输入导致了境内病毒广泛传播,每天由易感者转为暴露者的人数不断增加,第20 d首次超过10人,第50 d达到峰值108人,到第120 d仍有3名新增暴露者,累计感染3925人。通过海关入境人员脉冲输入下的疫情暴发时间推迟,并且规模减小。每日新增暴露者数量缓慢上升,最高只有每日13位易感者转化为暴露者,最终累计感染614人,约为前者的16%。

2.3 境内有疫情,境外有输入

第3种情景模拟了境内有疫情的情况下,入境隔离期的设置如何影响境内疫情的发展。

设定初始值 N_0 为5000, I_0 为1,境内采取基本检测措施($\sigma_1=0.1, \sigma_2=0.2$),进行为期120 d、脉冲输入周期为2 d的模拟。通过海关入境人员每次入境10人,其中 $E_{v_2}=1, I_{v_2}=1$ 。在通过海关入境人员中,最终入境的暴露者人数受到潜伏期和隔离期时间长短的共同影响,因此对入境人员隔离期从4~21 d的18种情景分别进行仿真实验(图6)。

仿真结果表明,隔离期为4 d时,境内疫情波峰最高为每日新增78人,出现在第62 d,累计感染人数为3853,高于其他情况下的感染人数。隔离期为5 d时,第60 d有80人由易感染变为暴露者,高于其他隔离期的峰值,累计感染3760人。可能是由于隔离期过短,大部分暴露者未经过潜伏期就结束隔离,入境成为病毒传播者,提高了疫情传播的风险。

随着隔离期延长,疫情波峰和累计感染人数呈现波动下降的趋势。当隔离期为18 d时,峰值为34人,感染总人数最低,为1327人。入境人员的潜伏期为18天及以上的发生概率无限接近于0,仅有极少数暴露者能通过隔离期间的检测,最终顺利入境成为感染者。因此隔离期为18~21 d的防控效果差异不明显。

总体上,波峰到来时间集中在55~64 d,在34~80人之间变化。18种情景下的累计感染人数差异明显,最低值为1327人,最高值为3853人。

3 入境人员资源投入量化评估

为保障口岸安全、严防境外输入性病例,中国政府及社会投入了大量资源用于从入境前到入境后的全流程管控,对高风险口岸和重点人群进行严密防范。已有研究对疫情防控措施的整体投入进行评估^[41-42],证明了部分防控措施如大规模核酸检测和疫苗接种具有较高的成本效益比,具备良好的经济性。根据仿真模拟得到的结果,对入境人员的资源投入进行量化评估,比较不同隔离天数带来的资源投入差异。

国家医疗保障局对于新冠患者的医保政策是“先救治、后结算”。截至2020年5月31日,全国确诊住院患者结算人数5.8万人次,总医疗费用13.5亿元,确诊患者人均医疗费用约2.3万元^[43]。对于入境人员输入病例中未参加基本医疗保险的人员,医疗费用原则上由患者个人负担。参加了商业保险的人员,则由商业保险公司按合同支付。各省市关于入境隔离费用的规定基本一致,入境人员在指定酒店隔离,费用自理。本研究将入境人员产生的资源投入分为在境内进行治疗的医疗资源投入和入境隔离的费用投入。通过比较入境前后资源总投入,反映出入境者人均产生的资源投入量。

t_1 到 t_2 时段,检测出携带病毒的暴露者和感染者进入 D_h 仓室接受治疗,累计医疗资源投入为:

$$DR = r_1 \sum_{t=t_1}^{t_2} D(t) \quad (24)$$

式中, r_1 为入院治疗者的每日人均占用医疗资源系数, $D(t)$ 为 t 时刻 D_h 仓内的人数。

t_1 到 t_2 时段,通过海关入境人员中的易感者、潜伏期超过隔离期的暴露者和恢复者则在指定地点进行隔离,入境隔离资源投入为:

$$VR = r_2 \sum_{t=t_1}^{t_2} v(t) \quad (25)$$

式中, r_2 为隔离者的每日人均隔离费用系数, $v(t)$ 为 t 时刻隔离的通过海关入境人数。

t_1 到 t_2 时段的资源总投入计算公式为:

$$SR = DR + VR \quad (26)$$

根据收集到的数据资料^[44],设定 $r_1:r_2=5:1$ 。

第3种情景中不同隔离期的资源投入统计如图7。从医疗资源看,住院者 D_h 仓室人数越多,产生的医疗资源投入 DR 越多。隔离4 d产生的医疗资源投入 DR 最多(216248.5 r_2),之后下降到109008.9 r_2 ,隔离期12 d开始反弹,隔离期18 d又回落到最低值(81000 r_2)。 DR 数量的波动是由于境内感染人数的变化。而境内感染不仅受到病毒传播的随机性影响,也受到入境人员中暴露者潜伏期概率分布的影响。尽管潜伏期的时长服从Gamma分布,但也有可能超过14 d,导致病毒携带者入境传播。而入境隔离费用投入 VR 的变化呈线性增长趋势,从2160 r_2 稳定增长到10380.32 r_2 。总体上,隔离期从4 d延长为11 d,入境人员带来的资源投入总量 SR 显著下降。从隔离期为11~21 d, SR 稳定在100000 r_2 左右。

从资源投入总量看,隔离期为4~10 d的结果差异明显。原因可能是随着隔离期的增加,潜伏期长于隔离期的人员大幅减少,给境内疫情造成的影响显著降低。境内的医疗资源占用的下降速度快于隔离资源的增加速度,最后形成资料资源占用总量降低的趋势。

而隔离期为11~21 d的结果差异不显著。分析原因是隔离期大于10 d后,潜伏期长于隔离期的人员总量小,且变化不明显。境内的医疗资源占用的下降速度与隔离资源的增加速度没有明显差距,最后形成资料资源占用总量波动的趋势。

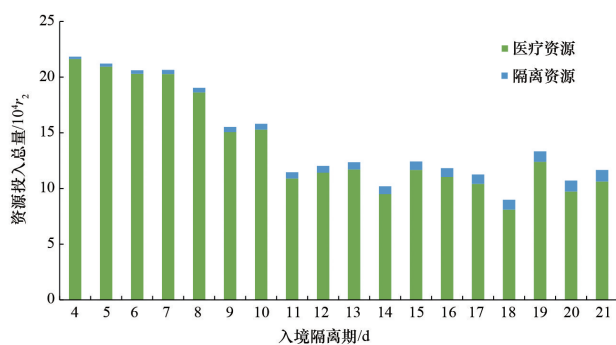


图7 隔离期4~21 d条件下资源投入总量

4 结论

基于新冠肺炎疫情的背景,对经典传染病动力

学模型进行改进,提出考虑境外入境性病例的SE-IDR模型。为了探究未经海关入境人员和通过海关入境人员可能带来的影响,进行了3类数值仿真实验。

第1类情景通过模拟无检测措施、采取基本检测措施和严格检测措施条件下的境内疫情发展情况,发现结果分别为疫情严重扩散、得到控制和几乎没有传播。综合考虑检测效率和医疗资源,现实情况难以具备检出率100%的理想条件,因此基本检测措施的应用广泛。

检测措施的制定不应一成不变,而应根据当地面临的境内外疫情风险和医疗资源条件进行动态调整。对于高风险、高资源储备的地区,应采取严格检测措施,合理分配医疗资源;对于高风险、低资源储备的地区,应采取较严格的检测措施,同时提升检测手段和调配医疗资源;对于低风险、高资源储备的地区,应采取基本检测措施,提前规划医疗资源的使用;对于低风险、低资源储备的地区,应采取基本检测措施,同时增加医疗资源的生产和储备。

第2类情景发现境内没有疫情时,入境人员未经海关自由入境会使病毒传播迅速达到峰值。这符合部分边境城市的情况:由于有境外人员通过未设关卡的边境入境,没有接受检测和隔离措施,与境内人员有密切接触,提高了输入性病例的风险。

尽管经过检测和14 d集中隔离,通过海关入境人员中仍有个别病毒携带者入境,造成了境内本土新增病例。这与境外输入病例的实际情况相符:部分新冠肺炎病毒具有超长潜伏期,在入境人员进行隔离期间没有检测出来,最后被携带入境。

未经海关入境的人员风险性高,对于此类人群应当采取全面且严格的防控措施。对于通过海关入境人员,除了在隔离期采取闭环管理外,应当注意防范其通过唾液、垃圾和接触到的环境传染给在隔离区工作的人员,造成境内疫情的扩散,需要对隔离场所加以规范,对其工作人员加强保护,避免一线工作人员出现集中感染。

第3类情景比较境内有疫情条件下,隔离期设置为4~21 d对境内疫情传播的影响,以及资源

占用总量的差异。当隔离期为4~10 d,输入性病例的数量下降,造成的境内感染者也随之减少。当隔离期为11~21 d,境内疫情仍有传播,境内感染人数差异不明显。原因可能有以下3点:入境人员中病毒携带者的潜伏期可能较长,经过隔离期后入境成为感染者;小世界网络中人与人的接触率有随机性,影响了易感者被感染的概率;新冠肺炎病毒的传播率具有随机性,影响了病毒传播的结果。

隔离期的设置会影响境外输入性病例的数量,从而影响境内疫情发展的趋势和最终占用的社会资源总量。入境隔离措施需要根据经济成本、社会成本和政治成本动态调整,过度采取高强度的管控措施不利于长期发展;对于来自不同风险区的入境人员,可以根据当地的疫情缓和程度进行综合考虑,不应采取“一刀切”的方案。

通过计算4~21 d隔离期的资源占用总量,发现隔离期为4~10 d的资源占用总量显著下降,隔离期为11~21 d的资源占用总量呈波动趋势。这说明隔离期从4 d增加到10 d提升了疫情防控的效果,减小了境外输入性病例带来的资源压力。隔离期从11 d增加到21 d没有明显改善境内疫情应对的资源压力。

建议合理设置入境人员隔离期的天数,通过加强国际防疫合作,制定完善的境内外疫情防控策略,逐渐恢复良好的国际合作与交流环境;整合各部门和各地区之间的医疗资源,缓解部分地区的医疗资源压力;提升医疗资源和隔离资源的使用和配置效率,从根本上保障医疗体系和公共卫生体系的可持续发展。

参考文献(References)

- [1] Johns Hopkins University. COVID-19 map[EB/OL]. [2022-02-26]. <https://coronavirus.jhu.edu/map.html>.
- [2] 新浪新闻. 境外输入疫情动态追踪[EB/OL]. [2022-02-26]. https://news.sina.cn/project/fy2020/noc_input_case.d.html?vt=4&pos=222.
- [3] 国家卫健委. 疫情通报[EB/OL]. [2022-02-26]. http://www.nhc.gov.cn/xcs/yqtb/list_gzbd.shtml.
- [4] 中国疾病预防控制中心. 新型冠状病毒肺炎疫情防控指南(第一版)[EB/OL]. [2022-02-26]. <http://www.nhc.gov.cn/jkj/s3578/202002/34c1c337ef874fa58af58a1717005389.shtml>.
- [5] 关于进一步加强国境卫生检疫工作 依法惩治妨害国境卫生检疫违法犯罪的意见[EB/OL]. [2022-02-26]. http://www.moj.gov.cn/pub/sfbgw/qmyfzg/fzgzffz/202003/t20200317_153170.html.
- [6] 我省多地筑牢“外防输入、内防反弹”防线[EB/OL]. [2022-02-26]. http://www.shaanxi.gov.cn/xw/sxyw/202201/t20220111_2207075_wap.html.
- [7] 刘英奎, 任国萍, 张文娅. 中国沿边开放的主要障碍及对策研究[J]. 区域经济评论, 2022(3): 151-157.
- [8] 胡敏, 岳勇, 杜训波, 等. 四川省成都市境外输入新型冠状病毒肺炎病例流行病学特征分析[J]. 疾病监测, 2021, 36(6): 587-592.
- [9] 戚小华, 刘碧瑶, 王臻, 等. 浙江省境外输入新型冠状病毒肺炎病例特征[J]. 预防医学, 2021, 33(6): 541-544.
- [10] Bernoulli D. Essai d'une nouvelle analyse de la mortalité causée par la petite vérole, et des avantages de l'inoculation pour la prévenir[J]. Mémoires de l'Académie Royale des Sciences(Paris), 1760: 1-45.
- [11] Kermack W O, McKendrick A G. A contribution to the mathematical theory of epidemics[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, 1927, 115(772): 700-721.
- [12] El-Doma M. Analysis of an age-dependent SI epidemic model with disease-induced mortality and proportionate mixing assumption: The case of vertically transmitted diseases[J]. Journal of Applied Mathematics, 2004, 2004(3): 235-254.
- [13] Iannelli M, Kim M Y, Park E J. Asymptotic behavior for an SIS epidemic model and its approximation[J]. Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications, 1999, 35(7): 797-814.
- [14] Schwartz I B, Smith H L. Infinite subharmonic bifurcation in an SEIR epidemic model[J]. Journal of Mathematical Biology, 1983, 18(3): 233-253.
- [15] Aron J L. Acquired immunity dependent upon exposure in an SIRS epidemic model[J]. Mathematical Biosciences, 1988, 88(1): 37-47.
- [16] Fitzgibbon W E, Parrott M E, Webb G F. A diffusive age-structured SEIRS epidemic model[J]. Methods and Applications of Analysis, 1996, 3(3): 358-369.
- [17] 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): 369-374.
- [18] 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.
- [19] 曹盛力, 冯沛华, 时朋朋. 修正SEIR传染病动力学模型应用于湖北省2019冠状病毒病(COVID-19)疫情预测和评估[J]. 浙江大学学报(医学版), 2020, 49(2): 178-184.
- [20] Yarsky P. A simple COVID-19 model applied to American states to simulate mitigation and containment strategies[J]. *Journal of Global Health Reports*, 2020, 4: e2020059.
- [21] 王志心, 刘治, 刘兆军. 基于机器学习的新型冠状病毒(COVID-19)疫情分析及预测[J]. *生物医学工程研究*, 2020, 39(1): 1-5.
- [22] 刘昌孝, 王玉丽, 张洪兵, 等. 应用“房室模型”动力学认识新型冠状病毒肺炎(COVID-19)暴发期的传播规律[J]. *现代药物与临床*, 2020, 35(4): 597-606.
- [23] 罗丹婷, 钱华, 刘聪, 等. 不同国家和时段COVID-19控制策略效果评价: 基于自适应PSO-SEIR模型[J]. *科学通报*, 2021, 66(Z1): 453-464.
- [24] Yang Z, Zeng Z, 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.
- [25] Qian X, Ukkusuri S V. Connecting urban transportation systems with the spread of infectious diseases: A Trans-SEIR modeling approach[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2021, 145(3): 185-211.
- [26] Li J, Zhong J, Ji Y M, et al. A new SEIAR model on small-world networks to assess the intervention measures in the COVID-19 pandemics[J]. *Results in Physics*, 2021, 25: 104-283.
- [27] 杜志成, 顾菁, 李菁华, 等. 基于区间删失数据估计方法的COVID-19潜伏期分布估计[J]. *中华流行病学杂志*, 2020, 41(7): 1000-1003.
- [28] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of 'small-world' networks[J]. *Nature*, 1998, 393(6684): 440-442.
- [29] Newman M E J, Watts D J. Renormalization group analysis of the small-world network model[J]. *Physics Letters A*, 1999, 263(4/6): 341-346.
- [30] Carrington P J, Scott J, Wasserman S. *Models and methods in social network analysis*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004: 117-145.
- [31] Fu X, Small M, Walker D M, et al. Epidemic dynamics on scale-free networks with piecewise linear infectivity and immunization[J]. *Physical Review E*, 2008, 77(3): 036113.
- [32] Younsi F Z, Bounnekar A, Hamdadou D, et al. SEIR-SW, simulation model of influenza spread based on the Small World network[J]. *Tsinghua Science and Technology*, 2015, 20(5): 460-473.
- [33] 杜志成, 郝元涛, 魏永越, 等. 基于马尔科夫链蒙特卡罗模拟方法的COVID-19年龄别病死率估计[J]. *中华流行病学杂志*, 2020, 41(11): 1777-1781.
- [34] 安徽: 回国人员确诊新冠肺炎 医疗费用按不同情况处理[EB/OL]. (2020-03-21)[2022-02-26]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-03/21/content_5493952.htm.
- [35] 中华医学会呼吸病学分会, 中国医师协会呼吸医师分会. 中国成人2019冠状病毒病的诊治与防控指南[J]. *中华医学杂志*, 2021, 101(18): 1293-1356.
- [36] 谢琳, 杨华磊, 吴远洋. 医疗卫生资源、新型冠状病毒肺炎死亡率与资源优化配置[J]. *经济与管理研究*, 2020, 41(8): 14-28.
- [37] 国家移民管理局. 边境缉毒12.46吨查获非法出入境人员8.9万人次[EB/OL]. (2021-01-20)[2022-02-26]. <https://www.nia.gov.cn/n794014/n1050181/n1050498/c1-373735/content.html>.
- [38] 杨孝坤, 李昱, 赵宏婷, 等. 新型冠状病毒感染不同阶段的传染性研究进展[J]. *中华流行病学杂志*, 2021, 42(1): 33-38.
- [39] 李凉凉. 物理-事理-人理三维视角下传染病传播动力学建模与仿真[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021: 23-32.
- [40] 吴尊友. 群体免疫作为新型冠状病毒肺炎防控策略可行性分析[J]. *中华流行病学杂志*, 2020, 41(7): 986-989.
- [41] 李浩楠, 张慧. 及时开展新冠疫情防控与大规模核酸检测的卫生经济学评价[J]. *现代预防医学*, 2022, 49(7): 1252-1258.
- [42] 黄勇, 倪莉红, 陈远源, 等. 广州市新型冠状病毒肺炎病例主动筛查的成本效果评价[J]. *现代预防医学*, 2021, 48(1): 97-100.
- [43] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 抗击新冠肺炎疫情的中国行动[N]. *人民日报*, 2020-06-08(10).
- [44] 深度关注|警惕入境人员防疫漏洞[EB/OL]. (2021-09-24)[2022-02-26]. http://www.hebcdi.gov.cn/2021-09/24/content_8622394.htm.

An infectious disease model considering the impact of imported cases on internal spread of COVID-19

XU Jingsi^{1,2}, WANG Zijun³, LIU Mengjie^{1,4}, LI Liangliang⁵, CHEN An^{2*}

1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
2. Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
3. School of Finance, Nankai University, Tianjin 300350, China
4. Sino-Danish College, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China
5. School of Business, Renmin University of China, Beijing 100872, China

Abstract The coronavirus disease 2019(COVID-19) pandemic spreads across borders with the frequent global population movement. To explore the impact of the COVID-19 pandemic on China's domestic epidemic prevention and control, based on the classical infectious disease dynamics model this paper proposes an infectious disease model that considers oversea imported cases. The model can simulate three situations: national pandemic without imported cases, no domestic cases with only imported cases, and domestic cases with international travellers entering simultaneously. By calculating the peak case number and range of infection spread duration in these situations, as well as the amount of medical resources invested, the model has shown the different results of impact of entry type on the domestic pandemic and different pressures on medical resources. Finally, the paper suggests that testing measures should be taken according to the degree of pandemic risk and resource conditions, that strict prevention and control should be applied to the people not entering through customs, and closed-loop management to the people entering through customs, that entry quarantine measures and quarantine periods should be dynamically adjusted and international exchanges should be gradually resumed in the context of ensuring domestic and overseas epidemic prevention and control in advance, and that it is necessary to integrate medical resources, improve allocation efficiency, and relieve the pressure of resource occupation.

Keywords COVID-19; epidemic prevention and control; imported cases; SEIDR model ●



(责任编辑 傅雪)