

基于隔离人群的SEIRS模型研究香港新冠肺炎传播趋势

郭慧敏

广东培正学院, 广东 广州

收稿日期: 2023年1月15日; 录用日期: 2023年2月15日; 发布日期: 2023年2月23日

摘 要

由于二次感染及“复阳”问题的出现, 以及隔离人群变量的增加, 本文在SEIR传染病模型基础上, 建立含有隔离人群的SEIRS模型。使用香港第五波新冠疫情数据, 通过最小二乘法求得含有隔离人群的SEIRS模型中各参数最优解, 并使用Python软件模拟得到新冠病毒传播趋势。结果显示: 含有隔离人群的SEIRS模型与香港新冠肺炎的实际传播走势较为一致。表明增加有效的隔离手段, 如建立方舱医院等方式, 能提升隔离率, 使感染人群数量不断下降, 从而以最大力量保护人民生命安全。

关键词

隔离人群, SEIQRS模型, 最小二乘法, 数值模拟

To Study the Transmission Trend of COVID-19 in Hong Kong Based on SEIRS Model of Quarantined Population

Huimin Guo

Guangdong Peizheng College, Guangzhou Guangdong

Received: Jan. 15th, 2023; accepted: Feb. 15th, 2023; published: Feb. 23rd, 2023

Abstract

Due to the emergence of secondary infection and “re-infection”, as well as the increase of quarantined population variables, a SEIRS model was established based on the SEIR epidemic model with quarantined population. Using the data of the fifth wave of COVID-19 in Hong Kong, the least square method was used to obtain the optimal solution of each parameter in the SEIRS model containing

the quarantined population, and the spread trend of COVID-19 was simulated by Python software. The result shows: the SEIRS model containing quarantined population is consistent with the actual transmission trend of COVID-19 in Hong Kong. It shows that increasing effective isolation methods, such as the establishment of mobile cabin hospitals, can improve the isolation rate, reduce the number of infected people, so as to protect people's lives as much as possible.

Keywords

Quarantined Population, SEIQRS Model, Least Square Method, Numerical Simulation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

新型冠状病毒肺炎(Corona Virus Disease 2019, COVID-19), 简称“新冠肺炎”。根据世界卫生组织统计数据, 2020 年初爆发至今, 全球新冠肺炎确诊病例达 489,779,062 例, 死亡病例达到 6,152,095 例, (来自网页: http://www.gov.cn/xinwen/2022-04/05/content_5683503.htm), 全球新冠确诊病例超过 100 万例的国家和地区达 56 个, 124 个国家和地区病例超 10 万例, 新冠病毒肆虐全球, 不容忽视。

各国学者把新冠肺炎疫情看作是全球性大流行病, 使用 SI、SIS、SIR、SIRS、SEIR 等常见传染病模型讨论其传播速度、空间范围、传播途径等问题[1]。然而新冠肺炎疫情爆发至今, 有研究[2] [3]发现, 在新冠肺炎治愈的患者中, 有部分患者治愈后又重新“复阳”, 或者二次感染新冠肺炎, 这些情况是无法继续使用 SIR 与 SEIR 传染病模型进行讨论的。同时在抗击新冠肺炎病毒过程中, 各个国家和地区采用多种方法进行防疫, 如建立方舱医院隔离感染人群, 采用疫苗防控手段, 预防呼吸道传染病。

因此本文将建立含有隔离人群的 SEIRS 模型研究新冠肺炎传播趋势。为了模拟病毒传播走势图, 本文使用最小二乘法确定模型中的参数, 最小二乘法(又称最小平方方法), 是一种数学优化技术。通过最小化误差的平方和寻找数据的最佳函数匹配[4], 其优点是通过计算机简单程序就能实现, 得到拟合曲线, 从而可以直观看出新冠肺炎疫情的发展趋势。

2. 数据与研究方法

2.1. 数据来源

2022 年初, 香港多地接连出现多例源头不明的新冠肺炎确诊病例。新冠病毒奥密克戎变异株及德尔塔变异株流入香港多个地区, 春节假期聚集性活动对疫情造成了进一步恶化, 多条隐性传播链形成, 造成社区隐性传播, 使得疫情日趋严峻, 突发了香港第五轮新冠肺炎疫情。特区政府卫生署卫生防护中心 3 月 6 日下午公布, 截至当天零时, 第五轮新冠疫情累计 458,986 人感染; 累计 1794 例死亡, 病死率 0.39% (来自网页: https://www.chp.gov.hk/files/pdf/local_situation_covid19_tc_20220306.pdf)。

本文从世界实时统计数据库 Worldometer 中收集了香港 2022 年 2 月 22 日至 3 月 22 日新冠肺炎日确诊病例人数, 日死亡人数以及 31 个省(自治区、直辖市)和新疆生产建设兵团新冠肺炎日确诊病例人数, 日死亡人数。将所收集的数据进行预处理, 使用 Python 软件中 Pyplot 绘图模块, 画出新增确诊人数折线图以及死亡人数折线图, 如图 1 所示。

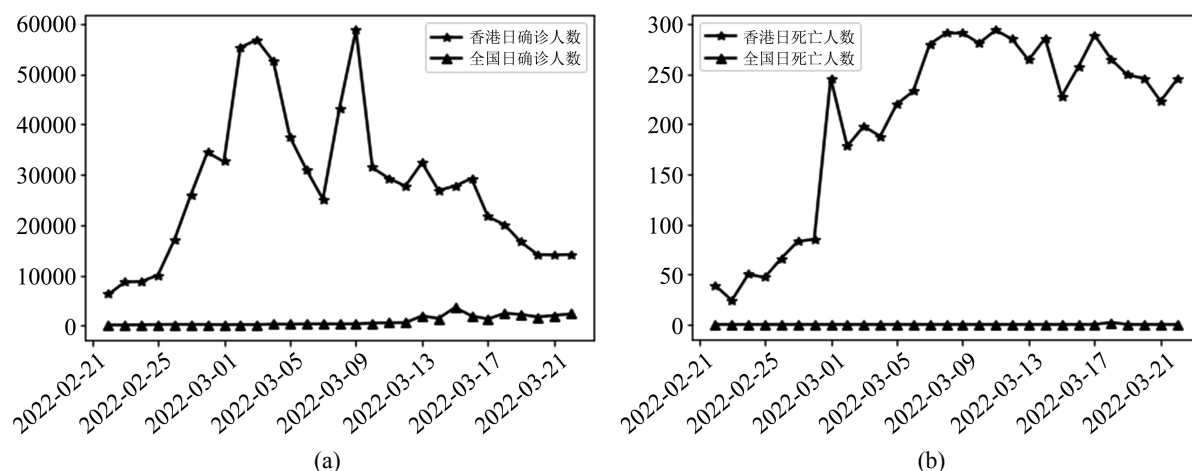


Figure 1. The daily number of new confirmed cases of new coronary pneumonia and the number of daily deaths
图 1. 新冠肺炎日新增确诊人数及日死亡人数图

由图可见，香港新增确诊人数与死亡人数远超 31 个省(自治区、直辖市)和新疆生产建设兵团新冠肺炎的新增确诊人数和死亡人数。2 月 27 日至 3 月 16 日之间，香港新增确诊人数每日超 20,000 人，死亡人数每日超 100 人，可见香港新冠肺炎疫情日趋严峻，不容客观，需使用必要的手段进行预防和控制。就在 3 月 1 日，香港抗击第五轮新冠肺炎疫情以来首个中央援建香港方舱医院——青衣方舱医院正式交付使用。该医院提供了超 3900 个隔离床位，对感染人群实行有效隔离，为香港抗疫防疫工作提供坚实保障。

2.2. SEIQRS 传染病模型的构建

查找相关报道及文献可知，新冠肺炎主要使用 SIR 与 SEIR 传染病模型进行讨论，SEIR 模型是在传统的 SIR 模型基础下引入潜伏期 E，与病人接触过的健康人群并不马上患病，而是成为病原体的携带者[5]。

经典的 SEIR 模型考虑了四类人群，即疫情爆发地的易感人群(S)、潜伏人群(E)、感染人群(I)与移除人群(R) [6]。其中，S 表示易感人群，即没有感染过病毒又不具备免疫力的健康人群；E 表示潜伏人群，即易感者与患者有效接触后处于感染潜伏期状态的人群，具备较低的传染能力；I 表示感染人群，已经感染病毒并且表现出症状的人群，具有传染能力；Q 表示隔离人群，即感染病毒后被确诊隔离的人群，考虑医院隔离措施严格不具有传染性；R 表示移除人群，表示患病死亡或康复的人群[7]。

考虑到本次疫情阶段，增加了防控手段——建立方舱医院，有效隔离感染人群，以及有文献指出有部分患者治愈后又重新“复阳”，或者二次感染新冠肺炎，本文在 SEIR 模型的基础上增加新变量 S、以及隔离人群 Q 两个变量。修正后的 SEIR 模型，记为 SEIQRS 模型，其动力学示意图如图 2 所示。

在管控措施的干预下，SEIQRS 模型微分方程为

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = -\frac{\beta IS}{N} + (\xi_1 + \xi_2)R \\ \frac{dE}{dt} = \frac{\beta IS}{N} - \sigma E \\ \frac{dI}{dt} = \sigma E - qI \\ \frac{dQ}{dt} = qI - \gamma Q \\ \frac{dR}{dt} = \gamma Q - (\xi_1 + \xi_2)R \end{cases}$$

其中, β 为易感人群感染新冠肺炎的传播速度; σ 为转化为感染人群的概率, $1/\sigma$ 为感染新冠肺炎的潜伏期; q 为隔离概率; γ 为转化为移除人群(死亡与治愈)的概率; $\xi_i (i=1,2)$ 为移除人群重新变为易感人群的概率, 其中 ξ_1 为“复阳”人群概率, ξ_2 为二次感染人群概率; N 为城市人口总数, 其中 $N = S + E + I + Q + R$ 。

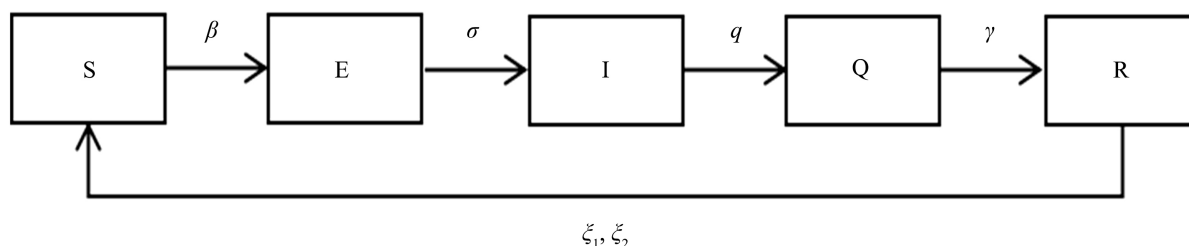


Figure 2. Schematic diagram of the SEIQRS infectious disease model

图 2. SEIQRS 传染病模型示意图

3. 模型的求解

3.1. 模型参数说明

SEIQRS 模型不考虑当年当地人口的出生率及死亡率, 且从香港特区统计处网站可查得 2021 年末香港人口数量约为 7,154,600 人, 假设 $N = 7,154,600$ 。

据香港卫生署公布, 本轮香港新冠肺炎感染病例中, 有 15 宗为德尔塔(Delta)变种病毒株, 其他大多数为奥密克戎(Omicron)变异病毒株。奥密克戎变异株平均潜伏期约为 3 至 4 天, 因此假设此次香港新冠肺炎潜伏期为 3 天, 即 $1/\sigma = 3$ 。

由于感染人群免疫力降低, 导致病毒清除不彻底; 医护人员检测技术不到位等[8]原因, 导致部分患者出院后出现核酸检测“复阳”现象。然而我国“复阳”病例的整体发生率较低, 约在 5%至 15%之间。因此本文取“复阳”比例最小值 5%, 作为移除人群概率, 即 $\xi_1 = 5\%$; 而目前受二次感染的病患非常少, 因此可设定 $\xi_2 = 0$ 。

3.2. SEIQRS 传染病模型模拟分析

由于香港于 3 月 1 日后才正式使用方舱医院, 对新冠肺炎感染人群进行有效隔离, 因此可假设 3 月 1 日前, 可假设新冠肺炎有效隔离率 $q = 0$ 。此时 SEIQRS 模型可看作 SEIRS 模型进行讨论, 查找资料[9]可得, 易感人群感染新冠肺炎的概率为 $\beta = 0.3965$, 移除人群(治愈人群及死亡人群)的概率 $\gamma = 0.006801$ 。因此, 使用 Python 软件进行数值模拟, 可得新冠肺炎病毒传播过程中各群体随时间变化的演化结果。

如图 3 可见, 在 60 天内, 若新冠感染人群不进行有效隔离, 随着时间的不断增长, 感染人群将越来越多, 在第 20 天后, 感染人群数量将以指数形式爆发增长, 第 50 天后, 感染人群将达到 6,000,000 人。因此, 需立即使用必要措施将感染人群与易感人群进行有效隔离, 降低感染人群数量。

在 3 月 1 日后, 香港青衣方舱医院的投入使用, 使大部分感染人群得到有效隔离。因此, 使用 3 月 1 日后感染人群、移除人群数据, 通过 Python 软件中的 odeint 函数模拟得感染人群及移除人群日新增数值解, 并使用香港新冠肺炎日确诊人数与移除人数, 使用最小二乘法, 计算出易感人群感染概率 $\beta = 0.2075$, 移除人群概率 $\gamma = 0.002001$ 。

但由于感染人群无法全部到达 100%的隔离, 因此讨论隔离率 q 分别等于 20%, 40%, 60%, 80%时, 新冠肺炎传播过程中各群体随时间变化的传播趋势。如下图 4 所示。

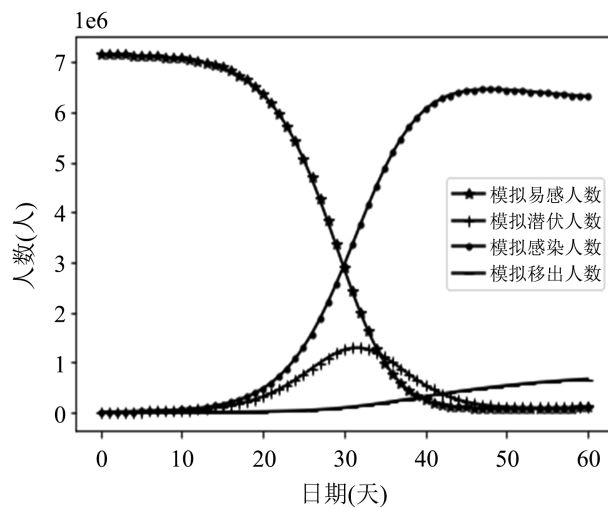


Figure 3. 60-day spread trend map of the new crown pneumonia epidemic in Hong Kong

图 3. 60 天香港新冠肺炎疫情的传播趋势图

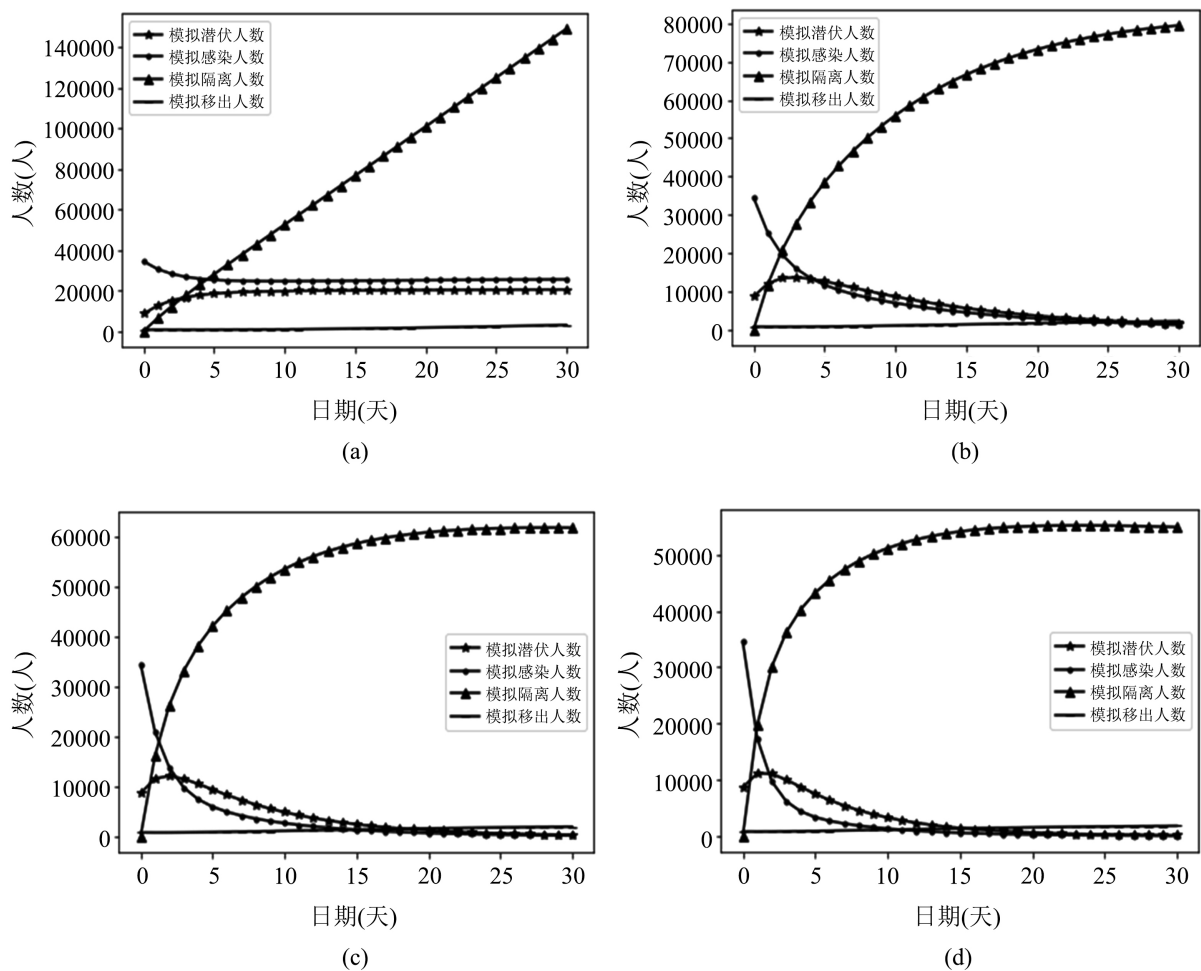


Figure 4. The transmission trend of the new crown pneumonia epidemic in Hong Kong under different isolation rates

图 4. 不同隔离率下香港新冠肺炎疫情的传播趋势图

其中, 图 4(a)表示隔离率 $q = 20\%$ 的 30 天内各群体传播趋势; 图 4(b)表示隔离率 $q = 40\%$ 的 30 天内各群体传播趋势; 图 4(c)隔离率 $q = 60\%$ 的 30 天内各群体传播趋势; 图 4(d)隔离率 $q = 80\%$ 的 30 天内各群体传播趋势。由此可见, 隔离率越高, 感染人群数量下降越快, 当隔离率为 20% 时, 感染人群下降较慢, 第 30 天感染人群仍在 20,000 人以上, 当隔离率为 40% 时, 需要 6 天把感染人群数量下降至 10,000 人以下, 隔离率为 60% 时, 只需要 4 天就能把感染人群数量下降至 10,000 人; 同时, 隔离率越高, 潜伏人群数量也越低, 当隔离率为 20% 时, 第 30 天潜伏人群数量仍处于 20,000 人, 而当隔离率为 80% 时, 隔离人群数量先增后减, 第 15 天后潜伏人群数量接近于 0。

4. 结论

将 3 月 1 日前后拟合数据进行合并, 与实际感染人数进行对比分析, 可得 30 天内感染人群实际传播趋势与模拟传播趋势, 如图 5 所示。

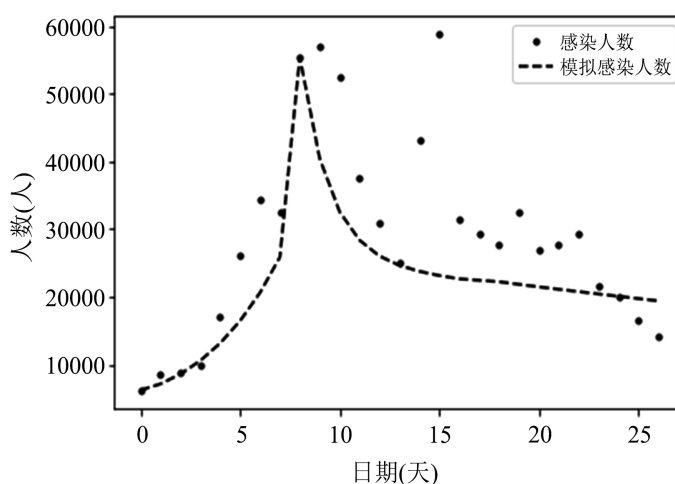


Figure 5. The actual transmission trend of the infected population and the simulated transmission trend

图 5. 感染人群实际传播趋势与模拟传播趋势

可见, 30 天内模拟传播趋势与实际传播趋势走势一致, 先增长后下降, 主要原因是前 8 天中, 感染人群隔离率为 0, 数值不断增长; 而后由于方舱医院的正式投入使用, 使得感染人群隔离率增加, 感染人群不断下降。由此可见, 模拟结果与实际数据走势一致, 因此对于新冠病毒的中期阶段, 应及时增加有效的隔离手段, 如建立方舱医院或自我隔离方式, 控制感染人数增加。

综合上述内容, 在新冠肺炎初期阶段, 随着时间的不断增长, 感染人群将越来越多, 若不进行有效隔离, 感染人群数量将以指数形式爆发增长。因此, 需立即采取必要措施, 将感染人群与易感人群进行有效隔离。在新冠病毒的中期阶段, 建立方舱医院、执行无条件 14 天自我隔离、交通管制等有效的隔离手段, 不断增加隔离率, 使感染人群数量不断下降, 从而以最大力量保护人民生命安全。

当前全球新冠肺炎大流行尚未结束, 全球疫情依然高位运行, 世界大部分国家和地区对新冠疫情仍保持着高于普通传染病的防控措施。我国疫情防控工作重心也从“防感染”转向“保健康、防重症”。虽然我国将新冠病毒感染从“乙类甲管”整为“乙类乙管”, 但国家卫健委曾说: “乙类乙管”不是被动放开, 绝不意味防控措施的退出。因此, 对于新冠肺炎的防控, 仍需强化管理、强化服务、强化保障, 努力保障人民健康安全。

基金项目

来源于 2021 年广东省普通高校青年人才创新项目, 名称《考虑二次感染新冠肺炎传染病模型的研究》编号 2021KQNCX133。

参考文献

- [1] 马知恩. 传染病动力学的数学建模与研究[Z]. 西安交通大学, 2004-12-01.
- [2] Vrieze, J. (2020) More People Are Getting COVID-19 Twice, Suggesting Immunity Wanes Quickly in Some. *Science*. <https://doi.org/10.1126/science.abf7769>
- [3] Edridge, A.W.D., *et al.* (2020) Seasonal Coronavirus Protective Immunity Is Short-Lasting. *Nature Medicine*, **26**, 1691-1693. <https://doi.org/10.1038/s41591-020-1083-1>
- [4] 冯长敏, 张炳江. 基于 BP 神经网络的分段函数连续优化处理[J]. 北京信息科技大学学报(自然科学版), 2019, 34(1): 18-22.
- [5] 郭卫云. 基于 SEIR 模型的传染病预测与可视化系统实现[D]: [硕士学位论文]. 邯郸: 河北工程大学, 2020.
- [6] 游光荣, 游翰霖, 赵得智, 廉振宇. 新冠肺炎疫情传播模型及防控干预措施的因果分析评估[J]. 科技导报, 2020, 38(6): 90-96.
- [7] 程哲阳. SEIR 改进模型及 COVID-2019 武汉疫情分析[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.
- [8] 周灵, 刘旭, 刘辉国. 新型冠状病毒肺炎患者出院后“复发”原因分析及治疗策略[J]. 中华结核和呼吸杂志, 2020(4): 281-284.
- [9] 郭慧敏. 基于 SEIRS 模型的香港新冠肺炎疫情传播趋势研究[J]. 新时代教育, 2022(18): 331-332.