目录可在 [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com) 上查阅

金融研究通讯

期刊主页: www.elsevier.com/locate/frl

COVID-19 大流行期间疫苗接种的最佳封锁政策

Yuting Fu , Hanqing Jin , Haitao Xiang , Ning Wang*

英国牛津大学数学研究所牛津晨氏金融大数据实验室

ARTICLE INFO

关键词:

COVID-19

平衡 SIR

锁定 最佳控制

ABSTRACT

随着 COVID-19 在全球蔓延, 许多国家在疫情初期采取了封锁措施, 以防止疫情扩散。封锁措施引发了争议, 因为这是在经济自由和公共卫生之间做出的选择。大流行病的最终解决方案是为大量人口接种疫苗, 以实现群体免疫。然而, 整个疫苗接种计划是一个漫长而复杂的过程。病毒和疫苗将在相当长的时间内共存。如何根据疫苗接种的进展逐步放松封锁是一个重要问题, 因为这涉及到经济和流行病学问题。在本文中, 我们扩展了经典的 SIR 模型, 以找到在疫苗接种推广过程中平衡经济和公共卫生的最优决策。该模型提供了一种疫苗价值评估方法。我们的研究结果为政策制定者提供了科学的建议, 帮助他们就如何在整个疫苗接种周期内逐步放宽封锁强度做出重要决策。

1. 引言

冠状病毒 (COVID-19) 的感染人数已超过 1 亿, 死亡人数超过 300 万, 是人类历史上最具破坏性的大流行病之一。目

前, 我们仍处于全球疫情的肆虐之中, 疫情已导致全球严重的经济损失。

衰落, 给许多国家造成了毁灭性的破坏 (Sulkowski, 2020 年)。全球经济被分为大流行前和大流行后阶段 (Zhang 等人, 2020 年)。金融市场受到 COVID-19 的重大影响, 包括大幅增加了波动性 (Albulescu, 2020 年), 降低了市场效率 (Wang 和 Wang, 2020 年)。为了遏制疾病的传播, 各国政府在疫情初期就采取了封锁措施。在不接种疫苗的情况下, 封锁比旅行禁令和经济刺激计划等其他措施更能有效减轻 COVID-19 的影响 (Narayan 等人, 2020 年)。一些国家多次进出封锁区, 这对金融市场产生了相当大的影响。封锁增加了股市的波动性和流动性 (Baig 等人, 2020 年)。封锁的严格程度对金融市场有双向影响 (Aggarwal 等人, 2020 年)。

封锁是经济自由与公众健康之间的两难选择。如果各国不尽快解除封锁, 就会导致经济停滞。另一方面, 一些国家为了防止经济衰退而过早开放, 从而引发了无数次的疫情浪潮。最近, 一些国家从解禁到恢复封锁, 反反复复, 几经反复。例如, 英国已经经历了第三个强制封锁期。因此, 是否实行和如何解除封锁, 应考虑公共福利和经济效益。

* 通讯作者。

电子邮件地址: ning.wang@maths.ox.ac.uk (N. Wang)。

<https://doi.org/10.1016/j.frl.2021.102123>

2021 年 1 月 31 日收到; 2021 年 4 月 21 日收到修订稿; 2021 年 5 月 6 日接受

2021 年 5 月 14 日在线提供

1544-6123/© 2021 The Author(s).

出版商: Elsevier Inc.

本文为 CC BY-NC-ND 许可下的开放存取文章

(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>) 。

大流行病的最终解决方案是为大量人口接种疫苗，以实现群体免疫。最近对 COVID-19 和疫苗生产的研究取得了重大进展。目前的疫苗研究已进入开发和生产过程。监管机构已经批准了一系列疫苗，许多国家正在进行大规模疫苗接种。尽管疫苗存在费用和安全问题（Forni 和 Mantovani, 2021 年），但人们只知道成功的疫苗接种计划是一个决定性的里程碑，它将结束大流行并带来强劲的经济复苏。疫苗大大减轻了以往大流行的不利影响（Gong 等人, 2020 年）。预测表明，如果不在全球范围内接种 COVID-19 疫苗，经济成本将会很高（Çakmaklı 等人, 2021 年）。疫苗也是推动股市价格的重要因素（Acharya 等人, 2020 年）。

从经济角度看，接种疫苗可能是恢复经济和社会正常的有效途径。封锁只能减缓流行病的传播，而接种疫苗则能防止人们感染疾病，从而使人们能够自由地工作和消费。很多人以为接种疫苗就能保护自己，接种疫苗后就可以立即放松封锁。然而，世界上有数十亿人在等待接种疫苗，而疫苗的产量仍然有限。整个疫苗接种过程漫长而复杂。未来，我们将在相当长的一段时间内与病毒和疫苗共存。考虑到疫苗接种的进度和隔离成本，在疫苗接种完成后，封锁将逐步解除。

如何根据疫苗接种的进展情况逐步放宽封锁是目前的一个重要问题。有必要建立一个定量模型来解决决策者在现实中可能面临的上述问题。我们扩展了经典的 SIR 模型（Harko 等人, 2014 年；Kermack 和 McKendrick, 1927 年），并结合均衡框架来研究大流行期间的最优封锁政策。该模型可通过跟踪疫苗接种进度来研究封锁政策在大流行中的作用。我们的研究表明，在疫苗接种期间逐步放宽封锁政策的力度至关重要。我们的模型还提供了解除封锁过程的最优估计。

多项研究表明，将疫苗接种与封锁结合起来是有益的。Garriga 等人（2020 年）、Alvarez 等人（2020 年）、Acemoglu 等人（2020 年）将疫苗接种纳入流行病学模型，研究最优封锁控制政策。它假设疫苗接种的到达是一个泊松过程，一旦疫苗接种到位，人们就会立即接种。然而，第二个假设过于简单。在现实中，由于生产力和疫苗接种推广速度有限，大量人口接种疫苗往往需要很短的时间。与之前的研究不同，我们假设疫苗接种从一开始就已经存在，并重点关注疫苗接种对封锁政策的影响。

当市场上有多种疫苗可供选择时，疫苗支出是决策者需要考虑的一个问题。我们提供了一种基于效用偏好的疫苗价值估算方法。估算结果可作为决策者选择不同疫苗的参考。在我们模拟的参数设置下，疫苗的估计价值大致处于当前市场疫苗价格的中间值。

本文的主要内容如下：在第 2 节中，我们介绍了带有疫苗接种的 SIR-Lockdown 模型。第 3 节讨论模型的参数估计。第 4 节介绍了接种疫苗的 SIR-Lockdown 模型的数值结果。第 5 节给出结论。

2. 模型

文献对流行病学模型进行了广泛研究，以分析大流行病的动态（Kucharski 等人, 2020 年；Liu 等人, 2020 年；Wang 等人, 2020 年；Wu 等人, 2020 年）并寻找最佳封锁政策（Alvarez 等人, 2020 年；Gonzalez-Eiras 和 Niepelt, 2020 年；Acemoglu 等人, 2020 年）。然而，关于疫苗接种期间的最佳封锁政策的讨论较少，许多国家都在进行疫苗接种，希望这是应对 COVID-19 大流行的最佳方法。在本节中，我们将扩展典型 SIR 模型，加入疫苗效应，以平衡 COVID-19 爆发期间的经济福利和公共卫生。我们还介绍了基于模型的疫苗价值估算。

2.1. 流行病学模型

正如经典的 SIR 模型（Kermack 和 McKendrick, 1927 年；Hethcote, 1989 年）所示，我们根据 Harko 等人（2014 年）的研究将人分为三类：

- 易感者（S）是指病毒检测未呈阳性者。
- 感染者（I）是指病毒检测呈阳性者；

- 康复者 (R) 是指病毒检测呈阳性、现已康复的人；

在一定单位时间内，我们假设所有易感人群都是以一定概率与感染者直接接触而被感染的主体，感染者将以一个恒定概率 π_r 康复或以另一个恒定概率 π_d 死亡。所有感染都是通过易感人群与感染者的直接接触发生的，分为三类活动：购买和/或消费商品和服务、与他人一起工作以及其他日常活动。接种疫苗是预防传染病传播的有效方法。

在没有接种疫苗的情况下，人们只能通过感染病毒然后康复来获得免疫力。现在，我们将疫苗接种纳入 SIR 模型，人们可以通过安全接种疫苗获得免疫力。

我们假设，在每个单位时间段内，有固定数量的易感人群 δ_v 接种疫苗，从而从下一个单位时间段开始转入康复人群。

我们使用下面的公式 (1-5) 来描述我们的扩展 SIR 模型，即四组之间的过渡，即易感人群、感染人群、康复人群和死亡人群。

$$T_t = \pi_{s1} S C_t^s / C_t^i + \pi_{s2} S N_t^s / N_t^i + \pi S I_{s3t} \quad (1)$$

$$S_{t+1} = S_t - T_t - \delta_s \quad (2)$$

$$I_{t+1} = I_t + T_t - (\pi_r + \pi_d) I_t \quad (3)$$

$$R_{t+1} = R_t + \pi I_t + \delta_r \quad (4)$$

$$D_{t+1} = D_t + \pi I_{dt} \quad (5)$$

在这个方程组中， S_t 、 I_t 、 R_t 和 D_t 分别代表在 t 时间分属易感人群、感染人群、康复人群和死亡人群的人数。我们用 (C^s, N^s) 来模拟易感人群的（平均）消费行为和工作时间。

同样，我们用 (C^i, N^i) 表示感染者，用 (C^r, N^r) 表示康复者。公式 (1) 中的 T_t 表示新感染者的数量。

在 t 至 $t+1$ 时间段内，传染病患者与易感人群之间通过直接接触传播。直接接触有三种，即消费接触、工作接触和其他日常生活接触。我们使用 3 个常数参数来描述这 3 种接触对感染率的贡献， π_{s1} 代表购买/消费， π_{s2} 代表工作， π_{s3} 代表其他接触。

2.2. 偏好模型

在本节中，我们将介绍三类人（S、I、R）的偏好模型，并分析他们在流行病学模型中的理性行为。

2.2.1. 不同类别个人的行为

我们研究的是所有人的理性行为，他们通过像正常时间一样选择适当的消费和工作时间来实现自身福利的最大化。我们使用以下效用函数来模拟个人从消费和工作中获得的效用、

$$u(c, n) = \ln c - \frac{\vartheta n^2}{2} \quad (6)$$

其中， c 是消费， n 是工作时间。在这个效用中，第一项衡量的是消费效用，第二项衡量的是工作效用， ϑ 是这两项之间的权重。

用 A 表示一个人每小时的平均工资，那么一个工作 n 小时的人的劳动收入为 An ，这将是消费的上限，即 $c \leq An$ 。

参数 ϑ 在经验上不易估算。我们假定当前的消费和工作行为都是最优的，从而将其固定下来。用 n_0 表示病毒传播前单位时间内的全部工作时间，这是由政府官方指导的。 n_0 自然是个人的最优设定。如果一个人按照 n_0 的最优方式全时工作，那么她的劳动收入将为 An_0 。由于效用函数在消费中严格递增，所有劳动收入都应消费完，因此最优消费 c_0 应为 $c_0 = An_0$ 。根据 n_0 的假定最优性，我们有 $\frac{\partial u(c_0, n_0)}{\partial n} = 1 - \vartheta n_0 = 0$ ，据此我们选择

$$\vartheta = 1 / (An_0)^2$$

给定终端时间 T ，消费流和工时流 $\{(c_t, n_t)\}_{t=\tau, \dots, T}$ 的总效用定义为

$$U(c, n) = \sum_{t=\tau}^T \beta^t u(c_t, n_t) \quad (7)$$

为了遏制病毒的传播，政府需要采用封锁政策来减少人与人之间的直接接触，这将对人们的行为施加更严格的约束。在本文中，我们通过对全员工作时间的比率 $L \in [0, 1]$ 的约束来研究封锁政策，即给定全员工作时间 n_0 ，最大工作时间不能超过 $n_0 * L$ 。我们假设政府不能轻易地将个人归入他们的类别，因此对工作的锁定约束对所有关心自身总效用的人来说，小时数都是一样的。我们在给定封锁政策 L 的情况下，为每类人群提出决策问题，然后研究政府的封锁政策决策问题。结果发现，感染者和康复者的最优行为非常简单，即在允许的范围内尽可能多地消费和工作。

做。¹⁴而对于易受影响的人来说，他们的最佳工作时间可能严格小于允许的工作时间。我们总结了这些最佳行为的特性（证明将在补充材料中进行）。

¹⁴我们默认病毒不会改变人们的理性和偏好。

- 在时间 t ，状态 X_t 和封锁策略 $\{L_\tau: \tau \in [t, T]\}$ ，恢复人员的最优行为 (c^r, n^r) 为

$$c_\tau^* = An L_{0\tau}, n_\tau^* = n L_{0\tau}, \tau = t, \dots, T_0$$

- 给定封锁策略 L ，感染者的最优行为 (c^i, n^i) 是

$$c_\tau^* = A\phi n L_{0\tau}, n_\tau^* = n L_{0\tau}, \tau = t, \dots, T_0 \quad (8)$$

- 给定封锁策略 L ，易感人群的最优 (c^{s*}, n^{s*}) 必须满足以下条件

$$c_\tau^{s*} = An^{s*}, \tau = t, \dots, T_0 \quad (9)$$

考虑到感染者的微不足道的最优行为 (c^{i*}, n^{i*}) 和康复者的最优行为 (c^{r*}, n^{r*}) 我们用 $J^{i*}(t, L)$ 和 $J(t, L)$ 表示。

$J^{i*}(t, L)$ 分别为这两类人从 t 到 T 的最优总效用。对于易感人群来说，由于她可能是她的总效用将涉及感染者和康复者的最优总效用。假设她行为流由 (c^s, n^s) 描述，那么，她的总效用 $J^s(c^s, n^s; X_t, L)$ 应满足

$$\begin{aligned} J^s(c^s, n^s; t, X_t, L) = & u(c^s, n^s) + \beta \frac{1 - \delta}{S_t} J^{i*}(t+1, L) \\ & + \beta \frac{1 - \delta}{S_t} (1 - \tau_t) J^s(c^s, n^s; t+1, X_t, L) \\ & + \beta \frac{\delta \nu r^*}{S_t} J(t+1, L). \end{aligned} \quad (10)$$

因此，易感人群的最佳行为可以表述为

$$\text{最大化}_n J^s(An^{s*}, n^s; t, X_t, L). \quad (11)$$

因为最优消费 $c^{s*} = An^{s*}$ 是由工作时间 n 决定的。

2.2.2. 决策者的最优控制

有了给定封锁策略 L 下每个类别的最优行为，我们就可以很容易地将最优策略制定问题表述为最优控制问题。

假设我们从某个时间 t 开始处理锁定问题₀，污染状态 X_t 由 S_t, I_t 和 R_t 给定。

r 的最优控制，那么最优锁定策略应该是

$$\max_{L_t} J^0(L; t, X_t) = \sum_{\tau=t}^T \beta^{\tau-t} [S_\tau u(c_\tau^{s*}, n_\tau^{s*}) + I_\tau u(c_\tau^{i*}, n_\tau^{i*}) + R_\tau u(c_\tau^{r*}, n_\tau^{r*})], \quad (12)$$

其中 $(c_\tau^{ca*}, n_\tau^{ca*})$ 是 ca 类人 (ca 可以是 s 、 i 或 r) 的最优消费和工作时间，它们都是确定的

在以前的优化问题中。

在以前的目标 J^0 中，我们删除了所有死亡病例而没有任何处罚。实际上，由于疾病死亡对家庭和社会都有很大的负面影响，监管者不应忽视任何死亡案例。我们通过引入重罚来修正之前的目标，并推导出新的目标

$$J^1(L; t, X_t) = \sum_{\tau=t}^T \beta^{\tau-t} [S_\tau u(c_\tau^{s*}, n_\tau^{s*}) + I_\tau u(c_\tau^{i*}, n_\tau^{i*}) + R_\tau u(c_\tau^{r*}, n_\tau^{r*}) - \lambda \rho_\tau u(c_\tau^{r*}, n_\tau^{r*})], \quad (13)$$

其中参数 $\lambda \geq 0$ 描述了我们对于病毒导致死亡的严重程度。在这个新目标中，我们用康复者最优效用的倍数来衡量死亡成本，而倍数 $\lambda > 0$ 可以看作是政府认为的死亡严重程度。当 $\lambda = 0$ 时， J^1 将还原为我们之前的目标 J^0 。

有了这个新目标，监管机构要解决的问题是

$$\begin{aligned} & \max_{L_t} J^1(L; t, X_t) \\ & \text{s.t. } L_t \in [0, 1] \quad \forall t \in [0, T]. \end{aligned} \quad (14)$$

表 1

模型参数。	
参数	值
π_1	1.244887×10^{-6}
π_2	1.0336×10^{-4}
π_3	0.01759
π_{cd}	0.00233
π_r	0.38656
π_0	36.9
ϕ	0.8
ϑ	$1/(36.9)^2$
δ_V	1/104

2.3. 示范应用：疫苗的价值

我们根据提出的模型介绍了一种疫苗接种价值估算方法。该方法基于效用冷漠，即在疫情结束时，如果不接种疫苗，整个人口的预期效用总量将保持不变。那么，在不接种疫苗的情况下，累积总效用之间的差距可视为疫苗价值的效用。将疫苗接种值记作 v ，接受疫苗接种的总人口百分比记作 N_v ，累积总效用记作 V_v ，未接种疫苗时从疫情开始到结束的效用记作 V_n 。根据效用无差别，我们可以得出

$$\log(vN_v) = V_v - V_n$$

(15)

关于疫苗接种的效用函数，由于我们在模型中使用对数作为消费的效用函数，如公式 (6)，因此我们在此也使用对数作为疫苗接种价值的效用函数。根据公式 (15)，我们可以估算出疫苗价值 v 。

3. 求解模型

3.1. 求解方案

在问题 (14) 或其简化版 (12) 中，涉及到所有三类个体的最优决策。幸运的是，由于我们的模型结构良好，康复者和感染者的最优决策是微不足道的，这样我们就可以在问题 (14) 之前解决易感人群的最优决策问题 (11)。

首先，我们以给定的锁定策略 L 解决问题 (11)。由于存在锁定约束，所以我们几乎没有希望得到一个明确的解。我们用与艾森鲍姆相同的方法数值求解这个最优控制问题等人 (2020)。在这种方法中，每个时间步的最优控制被视为带有消费预算和工作时间锁定政策两个约束条件的静态优化，通过求解相应的 KKT 条件来获得解。²

将最优控制 (c^{*}, n^{*}) 作为封锁策略 L 的函数，我们将最优控制问题 (14) 作为一个通过 Matlab 函数 `fmincon` 中使用的基于梯度的内点法，在高维空间 $[0, 1]^T$ 上进行优化。虽然我们没有关于我们方案收敛性的理论证明，但我们的数值结果表明了我们方案的收敛性。

我们方案中的部分代码来自 Eichenbaum 等人 (2020 年)。

3.2. 模型参数

在本小节中，我们将指定模型中的参数进行模拟。参数估计基于英国的 COVID 数据。详细参数估计过程参见 Fu 等人 (2020)。

为了简化流行病学模型，我们将起始人口设为 1，所有的人数都可以看作是初始时间 $t = 0$ 时总人口的百分比。此外，我们将单位时间段设为 1 周，这个时间段足够长，可以避免记录数据的延迟，而且足够频繁，可以显示流行病的变化。表

1 列出了数值实验中常用的参数和数值。

²事实上, 当我们将 Eichenbaum 等人 (2020) 提出的数值方案用于我们的问题时, 由于公式 (10) 中缺少一个复杂项, KKT 条件中使用的导数并不正确。由于以下两个原因, 我们决定忽略这个缺失: (1) 如果我们恢复这个复杂项, 计算将极其复杂; (2) 从 COVID-19 大流行的真实数据中, 我们知道第三个项 θr_t) 中的系数非常接近于 0, 这在我们的数值结果中也可以观察到。

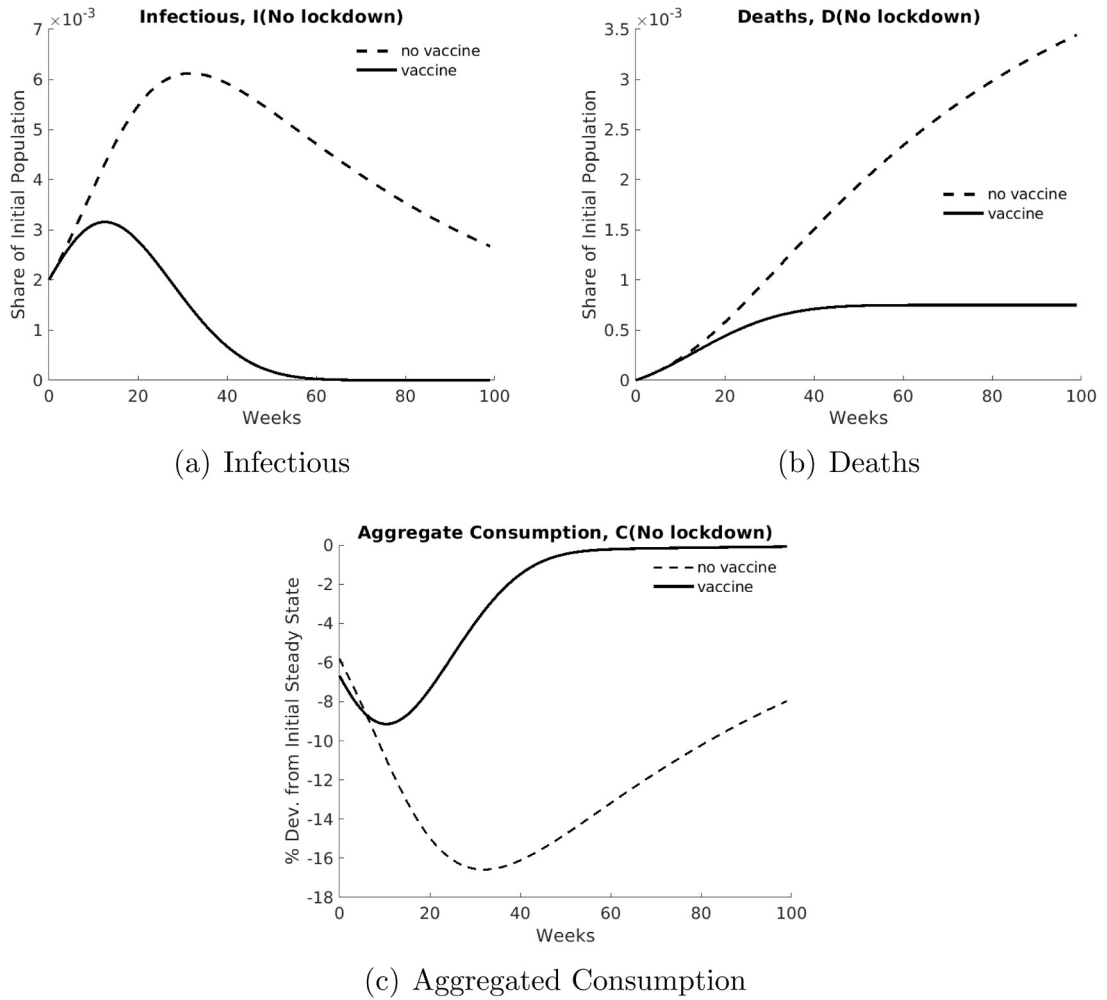


图 1. 接种疫苗对 COVID-19 不锁定的影响。

4. 数值结果

在本节中，我们将介绍在第 3.2 节参数设置下的数值实验结果。通过比较这些数值实验结果，我们认为在可以接种疫苗的情况下，封锁是必要的。

在本节介绍的每个实验中，初始状态都设定为 $(S, I, R) = (0.998, 0.002, 0)$ 。当整个种群恢复时，疫情停止。由于我们在模拟中设定 $\delta_s = 1/104$ ，因此假定接种疫苗，在没有封锁控制的情况下，大约需要 100 周才能结束模拟。本节中的所有封锁都是指第 2 节中定义的使整个人口效用最大化的最优封锁。

4.1. 不封锁的疫苗接种效果

首先，我们比较了在没有封锁的情况下疫苗对大流行病发展的影响。如图 1(a)所示，接种疫苗大大减少了易感人群之间的感染，抑制了传染性的增长。图 1(b)还显示，疫苗接种后死亡人数大幅减少，通过将易感人群转化为康复人群，加速了疫情的结束。随着越来越多的人康复，他们不会减少工作时间和消费，因此图 1(c) 中的总消费增加了。

4.2. 疫苗接种的最佳封锁效果

在本节中，我们将分析在可以接种疫苗的情况下，最优封锁策略对 COVID-19 趋势的影响。如图 2（a）所示，我们采用第 3 节中的参数求解方案来获得最佳封锁策略。

从图 2（b）中可以看出，通过限制工作时间和降低消耗，最优的封锁政策显著地

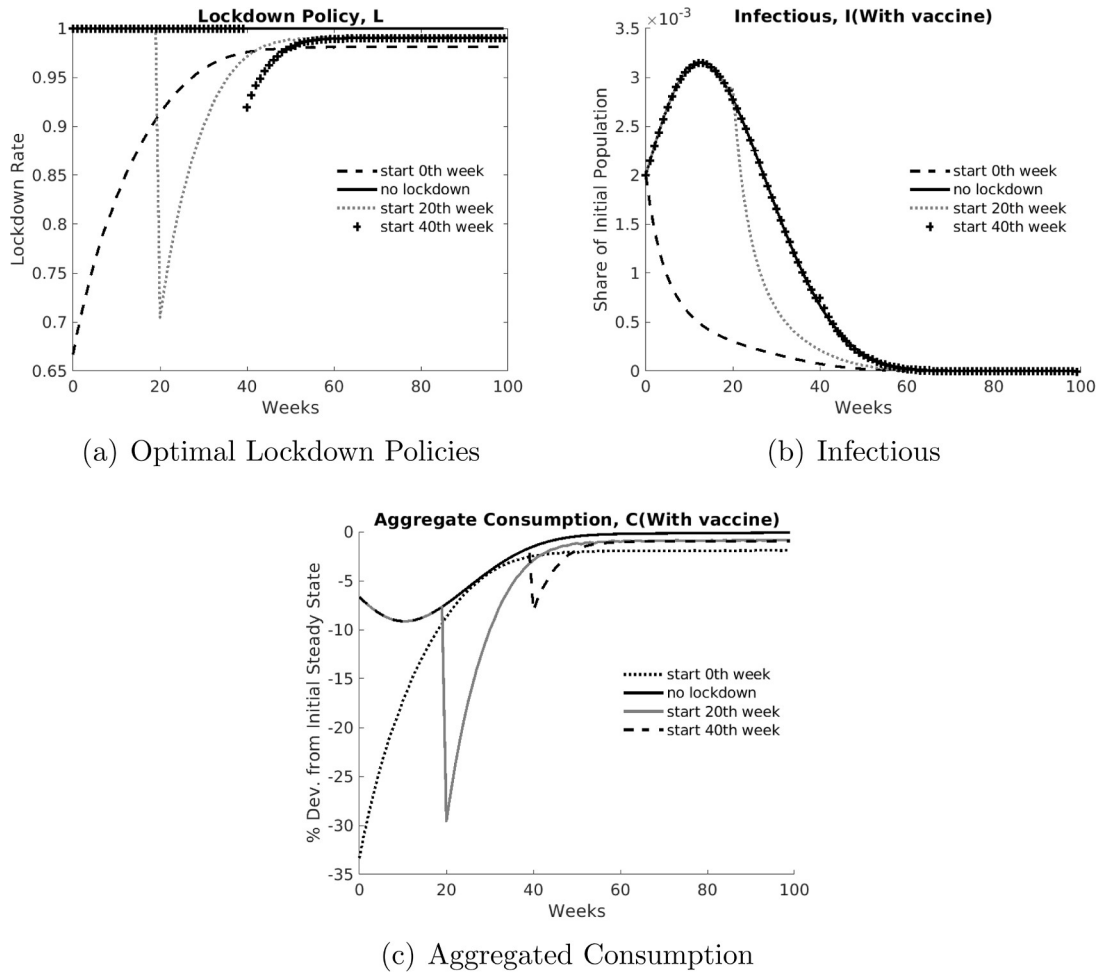


图 2.接种疫苗后 COVID-19 的最佳锁定效果。

表 2

易感者 (S)、感染者 (I) 和康复者 (R) 预期效用的减少。

人物类别	S	I	R
锁定后的理性易感性	3.8	152	2.2
没有封锁的理性易感性	10.6	149.9	0
锁定后的非理性易感性	3.8	152	2.2
没有封锁的非理性易感性	28.1	149.9	0

表 3

减少易感者 (S)、感染者 (I) 和康复者 (R) 的累积效用。

初始感染人群	0.002	0.005	0.01
理性 易感	3.9	5.9	7.1
非理性易感性	8.7	17.2	25.4

减少易感者和感染者之间的互动风险，同时减缓疾病的传播。对于康复者和感染者来说，最佳封锁限制了他们的工作时间和消费。对于易感者来说，如果不实行封锁，易感者会减少工作时间和消费，以降低感染的概率。最佳封锁迫使易感者减

少更多的工作时间和消费。

最优的封锁政策是以消耗损失为代价，最大限度地提高整个群体的效用。图 2 (c) 显示了锁定与不锁定情况下的总消耗量之间的明显差异。有必要在开始时进行锁定

表 4

疫苗公司和价格。

公司名称	价格 (英镑)
阿斯利康	2.2-2.9
强生公司	7.3
Novavax	11.6
辉瑞	15
现代	25

疫苗接种时的疫情。就预期效用而言,封锁对易感人群有利,对感染者和康复者略有不利(见表2)。在现实中,由于各种原因,易感人群不可能完全理性地使其效用最大化。例如,在大流行病隔离期间,人们可能希望消费更多,以满足精神需求。在极端情况下,易感人群会失去理性,像往常一样消费和工作(见表2),那么最优封锁就更有必要使易感人群的效用受益。由于易感人群一开始就在人群中占主导地位,因此在政策制定者看来,优化易感人群的效用以最大化整个人群的效用是合理的。

表3显示,初始情况越严重,即感染人群越多,就越有必要实施封锁。在易感人群不减少工作时间和消费的极端情况下,封锁会更加有效。

4.3. 提前/延迟开始封锁

我们已经证明,在疫苗接种的早期阶段,封锁是适当的。但事实上,政策制定者需要时间来完成对封锁的规定。在此,我们将讨论是否有必要在疫苗接种过程的中期进行封锁。我们的重点是延迟封锁对疫苗接种过程的影响。

如图2(b)所示,封锁开始得越早,效果就越好。图2(c)表明,当最优封锁政策从第0周或第20周开始实施时,总消费量与无控制情况下的总消费量有显著差异。然而,在第40周之后,封锁政策的影响就微乎其微了。

如图2(a)所示,当锁定开始较晚时,最佳锁定水平会降低。这可能是因为随着封锁的严格化,封锁对易感人群效用的益处将被封锁对康复人群的不利影响所超越。而且,随着易感人群的减少和康复人群的增加,更严格的封锁会使整体效用更差。

图2(c)中的结果有助于决策者了解情况,决定如何以及何时启动或放松封锁政策。如图2(c)所示,易感人群的工作时间和消费恢复正常是解除封锁的标志。随着感染人群的减少,被感染的概率也会下降。因此,易感人群将不再害怕被感染,从而使其工作时间和消费恢复正常。

4.4. 疫苗价值估算

在本小节中,我们将在3.2节的模拟参数设置下应用2.3节中的疫苗价值估计方法。为了通过式(15)获得疫苗价值估计值,我们将在模拟中说明如何估计式(15)中的 V_v 和 V_n 。根据第4.1节的结果,在接种疫苗的情况下,疫情在第100周结束,此时 V_v 可用。但是,在没有接种疫苗的情况下,疫情远未结束。我们假设在第100周可以接种疫苗,从而迫使疫情结束,在这种情况下,累积的总效用就是 V_n 的估计值。那么根据公式(15)我们就可以得到 V 的估计值。

从传染性人口0.002开始,疫苗的估计值为11.5。我们的估算值大约处于市场上现有疫苗价格的中间值(表34)。

需要提及的是,疫苗价值的估算是基于我们的模型,而我们的模型过度简化了现实,例如,模型中没有包括人们的储蓄行为。估算出的疫苗价值可作为决策者在疫苗支出方面的参考。

5. 结论

在本文中，我们研究了疫苗接种与封锁政策之间的关系，并探讨了在可以接种疫苗的情况下如何逐步放宽封锁强度的问题。我们对典型流行病学模型 SIR 进行了扩展，以找到一种最优决策，从而在经济和公共卫生之间取得平衡。在该模型中，不同健康状况的人在工作时间和消费上做出不同决策，以最大化自身效用，而政策制定者则控制封锁力度。

³数据来源：<https://www.bmj.com/content/371/bmj.m4670> <https://www.healthline.com/health-news/how-much-will-it-cost-to-get-a-covid-19-vaccine>

率，以实现整体福利最大化。这就产生了一个两阶段优化问题。该模型还能对疫苗价值进行估算。我们的研究结果表明，虽然疫苗接种可以有效减少 COVID-19 造成的死亡和感染，但在疫苗接种初期仍有必要进行封锁。感染人群越大，疫苗接种期间就越需要严格的最佳封锁。研究结果为政策制定者在整个疫苗接种周期内何时启动和解除封锁政策提供了科学建议。

CRedit 作者贡献声明

傅玉婷数据整理、撰写 - 原稿。**金汉卿**督导、方法论、写作--审阅与编辑。**向海涛**: 概念化、方法学。**王宁**指导、方法论、写作--审阅和编辑。

鸣谢

这项工作得到了牛津大学牛津 NIE 金融大数据实验室的支持。我们感谢 HPCC 系统和 VeChain 基金会提供的研究资金支持。

补充材料

与本文相关的补充材料在线版见 doi:10.1016/j.frl.2021.102123。

参考资料

- Acemoglu, D., Chernozhukov, V., Werning, I., Whinston, M.D., 2020. Optimal Targeted Lockdowns in a Multi-Group Sir Model. NBER Working Paper 27102. Acharya, V.V., Johnson, T., Sundaresan, S., Zheng, S., 2020. The Value of a Cure: An Asset Pricing Perspective. 技术报告。技术报告。研究。
- Aggarwal, S., Nawn, S., Dugar, A., 2020. 是什么导致了病毒大流行期间全球股市的崩溃? Finance Res. Lett. 101827.
- Albulescu, C.T., 2020. COVID-19 and the United States financial markets' volatility. Finance Res. Lett. 101699.
- Alvarez, F.E., Argente, D., Lippi, F., 2020. COVID-19 封锁的简单规划问题。技术报告。国家经济研究局。
- Baig, A.S., Butt, H.A., Haroon, O., Rizvi, S.A.R., 2020. 死亡、恐慌、封锁与美国股票市场: 科维德-19 大流行病案例。 Finance Res. Lett. 101701. Çakmaklı, C., Demiralp, S., Kalemli-Ozcan, S., Yesiltas, S., Yıldırım, M.A., 2021. 全球疫苗接种的经济案例: 全球疫苗接种的经济学案例
- 国际生产网络。工作文件 28395。美国国家经济研究局。 <https://doi.org/10.3386/w28395>. <http://www.nber.org/papers/w28395>
- Eichenbaum, M.S., Rebelo, S., Trabandt, M., 2020. 流行病的宏观经济学》。技术报告。国家经济研究局。 Forni, G., Mantovani, A., 2021. COVID-19 疫苗: 我们的立场和未来的挑战。 细胞死亡差异. 1-14.
- Fu, Y., Xiang, H., Jin, H., Wang, N., 2020. COVID-19 的最优封锁政策: 一项建模研究。 https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3776635.
- Garriga, C., Manuelli, R., Sanghi, S., et al., 2020. 流行病的最佳管理: 封锁、疫苗和生命价值。技术报告。 Gong, D., Jiang, T., Lu, L., 2020. 流行病与银行贷款: 来自 2009 年 H1N1 流感的证据。 Finance Res. Lett. 101627.
- Gonzalez-Eiras, M., Niepelt, D., 2020. 流行病期间的最佳“封锁”。技术报告。 CESifo Working Paper.
- Harko, T., Lobo, F.S., Mak, M., 2014. 易感-感染-恢复 (sir) 流行病模型和具有相同死亡率和出生率的 sir 模型的精确解析解。 应用数学。计算。 236, 184-194.
- Hethcote, H.W., 1989. Three basic epidemiological models. Applied Mathematical Ecology. Springer, pp.
- Kermack, W.O., McKendrick, A.G., 1927. 对流行病数学理论的贡献。 Proc. R. Soc. London Ser. A 115 (772), 700-721.
- Kucharski, A.J., Russell, T.W., Diamond, C., Liu, Y., Edmunds, J., Funk, S., Eggo, R.M., Sun, F., Jit, M., Munday, J.D., et al., 2020. 早期传播和控制 COVID-19: 数学模型研究。 Lancet Infect. Dis.
- Liu, Y., Gayle, A.A., Wilder-Smith, A., Rocklöv, J., 2020. 与沙新型冠状病毒相比, COVID-19 的繁殖数量更高。 J. Travel Med. Narayan, P.K., Phan, D.H.B., Liu, G., 2020. COVID-19 封锁、经济刺激计划、旅行禁令和股票回报。 Finance Res. Lett. 101732.
- Sułkowski, Ł., 2020. COVID-19 大流行; 衰退, 导致去全球化的虚拟革命? J. Intercult. J. Intercult. 12 (1), 1-11.
- Wang, J., Wang, X., 2020. COVID-19 与金融市场效率: 基于熵的分析证据。 Finance Res. Lett. 101888.
- Wang, N., Fu, Y., Zhang, H., Shi, H., 2020. COVID-19 疫情数学模型评估。 Precis. Clin. Med.
- Wu, J.T., Leung, K., Leung, G.M., 2020. 源于中国武汉的 2019-nCoV 疫情潜在国内外传播的预测与预报: 一项建模研究》 (Nowcasting and forecasting the potential domestic and international spread of the 2019-nCoV outbreak originating in Wuhan, China: a modelling study. Lancet 395 (10225), 689-697.
- Zhang, D., Hu, M., Ji, Q., 2020. COVID-19 全球大流行下的金融市场。 Finance Res. Lett. 36, 101528.