



西南财经大学
SOUTHWESTERN UNIVERSITY OF FINANCE AND ECONOMICS

SOUTHWESTERN UNIVERSITY OF FINANCE AND ECONOMICS

学士学位论文

BACHELOR THESIS



论文题目 _____ 论文标题 _____

学科专业	专业
学 号	666666
作者姓名	学生姓名
指导老师	教师姓名

摘 要

奥密克戎在世界各地广泛传播，新的疫苗正在研发当中，如何根据疫苗接种的进程逐步放松封锁是一个重要问题，在本文中，我们构建修正的 SEIR 模型，在传统 SEIR 模型基础上，针对奥密克戎传播速度快、隐匿性高、人群普遍易感等流行病学特征，引入密接者、次密接者等组别，以找到在疫苗推广过程中平衡经济和公共卫生的最优决策。同时我们使用参数估计的方法估计疫苗价值。为政策制定者提供科学的建议，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。

关键词： 奥密克戎，SEIR 模型，最优控制

ABSTRACT

Omicron is widely spread around the world, and new vaccines are being developed. How to sleep locks according to the progress of the vaccine process is an important issue. In this article, we build a modified SEIR model. Based on the traditional SEIR model, we target Omicron. Due to the epidemiological characteristics of Mikron, such as fast transmission, high concealment, and general susceptibility of the population, groups such as close contacts and sub-close contacts are introduced to find the optimal decision to balance economy and public health in the process of vaccine promotion. At the same time, we use parameter estimation methods to estimate the vaccine value. Providing scientific advice to policy makers to help them make important decisions on how to gradually ease the intensity of lockdowns throughout the vaccination cycle.

Keywords: Omicron, SEIR model, Optimal Control

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 研究工作的背景与意义	1
1.2 本论文的结构安排	2
第二章 SEIR 模型	3
2.1 数据假设	3
2.2 修正 SEIR 模型	4
2.3 模型参数	5
第三章 效用偏好模型	7
3.1 各个类别的行为	7
3.2 带疫苗接种的控制模型	9
第四章 模型求解	11
4.1 求解方案	11
4.2 模型参数	11
第五章 全文总结与展望	13
5.1 全文总结	13
致 谢	14

第一章 绪论

1.1 研究工作的背景与意义

奥密克戎在世界各地广泛传播，大型城市作为连接国内外交通的重要枢纽，自 2022 年 2 月以来持续受其影响，感染者数量迅速增加。我们在传统的 SEIR 传染病动力学模型基础上，针对奥密克戎传播速度快、隐匿性高、人群普遍易感等流行病学特征，引入具有政策性特征的组别，即密接者、次密接者、入市隔离者和携带者组别，构建修正的易感 - 暴露 - 感染 - 康复 (SEIR) 模型，拟合疫情数据确定修正模型的相关参数，为大型城市疫情防控工作提供具有应用价值的政策参考和建议。

流行病学模型被广泛应用于预测疫情的进程。但这些模型却有一个明显的缺点：它们不允许经济决策和感染率之间的互动。在本文，我们扩展了修正 SEIR 模型，以研究经济决策和流行病动态之间的平衡相互作用。我们的模型具有流行病和经济之间的双向相互作用。以总死亡人数来衡量，人们决定减少消费和工作，从而降低了疫情的严重性，这些同样的决定加剧了疫情造成的衰退的规模。

在我们的模型中，流行病既有总需求，也有总供应效应。供应效应的产生是因为疫情使工人暴露在病毒之下。工人通过减少劳动力供应来应对这种风险，需求效应的产生是因为疫情使消费者暴露在病毒之下。消费者通过减少消费来应对这种风险。供需效应相同作用，产生了大规模的、持续的衰退。

竞争均衡不是帕累托最优的，因为感染病毒的人没有充分内化他们的消费和工作决定对病毒的影响。这种市场失灵并不反应出感染者缺乏良好意图或不理性。它只是表明每个感染者都按给定的经济范围的感染率。但总的来说，他们的行为确实改变了感染率，从而给易感人群带来了不定价的成本。

政府应采用减少消费和工作时间的简单遏制政策。通过减少人与人之间的经济互动，这些政策加剧了经济衰退，但通过减少疫情造成的死亡人数来提高福利。研究表明，引入大规模遏制措施是最佳的。

为了使得到的结果更加直观和易于理解，让人们能够更容易地理解结果的含义和推论，我们使用了一个相对简单的模型。它造成的代价是我们无法研究与疫情相关的许多重要政策问题。例如，我们不考虑减轻家庭和企业遭

受的经济困难的政策，此类政策包括向家庭转移财政和贷款，以防止公司破产。

我们假设购买消费品和工作会让人们相互接触，这些活动提高了感染传播的概率。我们采用一个称之为“智能遏制”的解决方案，要求康复者除非康复，否则不会工作。这种隔离政策意味着易感人群可以在没有感染风险的情况下工作，易感者和康复者的消费量与疫情前稳定状态相同。感染者的消费取决于在没有感染他人风险的情况下向他们接触。

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。奥密克戎是强传播性的 COVID-19 变体，目前的疫苗研究已进入开发和生产阶段。许多国家正在进行大规模疫苗接种。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。

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。我们使用修正的 SEIR 模型并结合均衡框架来研究大流行期间的最优封锁策略。该模型可以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。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。将疫苗接种纳入流行病模型，研究最优封锁控制策略。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。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。

1.2 本论文的结构安排

本文的章节结构安排如下：

- SEIR 模型
- 效用偏好模型
- 模型求解
- 全文总结与展望

第二章 SEIR 模型

2.1 数据假设

2021 年 11 月全球受到奥密克戎的影响，新型冠状病毒感染（COVID-19）疫情进入新高峰。奥密克戎具有传染性强、传播速度快、隐匿性高、人群普遍易感等特点，给我国疫情防控带来了更大的压力和挑战。

近年来，易感-暴露-感染-康复（SEIR）等经典传染病研究模型在 COVID-19 的预测和评估中得到了广泛应用。本文构建了修正对的 SEIR 模型：（1）通过对奥密克戎流行病学特征的深入分析，引入了携带者组别；（2）根据政府干预措施、干预程度和时间变化，将被隔离者精细划分为三类：密接者（ Q_1 ）、入市隔离者（ Q_2 ）及次密接者（ Q_3 ）；（3）基于真实世界数据，运用 MATLAB 进行仿真模拟。本研究得到的部分预测数据不仅实现早期预警，还能为政府后续的防控政策调整和医疗资源配置提供决策支持；（4）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，死亡者（D）因奥密克戎病毒死亡者。

本研究中修正 SEIR 模型的基本假设是：

（1）不考虑人群的变化，包括出生、死亡、流动，即此地区是一个封闭的环境，总人群是一个常数，不发生变化；任何时刻的人类人群总数不变： $S(t) + A(t) + R(t) + D(t) + Q_1(t) + Q_2(t) + Q_3(t) = N$ 。

（2）考虑到在疫情期间进入深圳的流动人口，需要根据城市的疫情防控政策要求进行一定时间的集中隔离，于是，本文称之为入市隔离人员。入市隔离人员基本由国内中高风险地区入市人员、境外输入人员组成。将每日入市隔离人员数量设为 L_1 ，为已知常数。

（3）假设全民筛查最终可筛选出全部本地阳性患者（不一定即刻筛出，但按照中国的严格措施，阳性患者不会被漏掉）。

（4）假设不存在 COVID-19 治愈特效药。

（5）为简化模型，暂且不考虑康复者复阳情况。

（6）感染者将以一个恒定的概率 Π_r 康复或以另一个恒定概率 Π_d 死亡。

（7）所有感染都是通过易感人群与病毒携带者的直接接触发生的，分为三类活动：购买商品和消费服务 Π_1 、与他人一起工作 Π_2 以及其他日常活动

Π_3 。

(8) 假设在单位时间内, 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开始转入康复人群。

2.2 修正 SEIR 模型

SEIR 模型是传染病研究中一种经典的动力学模型, 模型简洁, 参数较少, 可被广泛地研究和使用的。SEIR 模型假设在一个复杂网络群体中所有个体可以大致分为有限的几种状态, 研究者可根据流行病发展和研究阶段的需要, 组合使用这些状态以表现不同状态之间的转换顺序和流行病所处的阶段。经典的 SEIR 模型将人群分为易感者 (susceptible, S)、暴露者 (exposed, E)、感染者 (infected, I) 和康复者 (recovered, R)。本文针对城市当前的疫情防控政策在传统的 SEIR 模型是上引入政策性组别密接者 (Q_1)、次密接者 (Q_3)、入市隔离者 (Q_2) 和携带者 (A) 做了如下两点改进:

(1) 传统的 SEIR 模型中 E 指接触过感染者但不具有传染性的人群组别。但是, 奥密克戎变异株具有 1~3 d 的潜伏期, 且传染性较强, 因此, 传统的 SEIR 模型不再适用于由奥密克戎变异株引起的传播。于是, 本文引入携带者群组 A 代替了传统 SEIR 模型中暴露者群组 E 的人群组别状态, 并将该组别人群定义为已经携带奥密克戎病毒, 但在被确诊为阳性前, 一直隐匿在本地疫情传播链条中。

(2) 城市针对 COVID-19 疫情采取的防控策略主要包括以下几种手段: 对中高风险地区、境外的闭环管理; 全民核酸筛查; 集中隔离感染者的密接者和次密接者; 定点医院救治感染者。因此, 本模型中引入入市隔离者和中高风险地区、境外的闭环管理策略。携带者群组 A 影响全民核酸筛查的时间长度和频率。人群组别新增密接者 (Q_1) 和次密接者 (Q_3) 影响集中隔离感染者的密接者和此密接者策略的实施。此外, 有症状和无症状的感染者均会被立即送往定点医院进行隔离治疗, 故本研究中的修正 SEIR 模型将两者均归为感染者组别。

用于奥密克戎疫情防控的修正 SEIR 动力学方程构建如下：

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{t+1} = S_t - (p_1 + p_3 + \beta)H_t + \lambda_1 Q_1 + \lambda_3 Q_3 + q_i Q_2 - L_1 - \delta_v \\ A_{t+1} = A_t + \beta H_t - \varepsilon A_t \\ I_{t+1} = I_t - (\Pi_r + \Pi_d)I_t + \varepsilon A_t + \delta_1 Q_1 + \delta_3 Q_3 + q_s Q_2 \\ R_{t+1} = R_t + \Pi_r I_t + \delta_v \\ D_{t+1} = D_t + \Pi_d I_t \\ Q_{1,t+1} = Q_{1,t} + p_1 H_t - [\lambda_1 + \delta_1]Q_{1,t} \\ Q_{2,t+1} = Q_{2,t} + L_1 - (q_i + q_s)Q_{2,t} \\ Q_{3,t+1} = Q_{3,t} + p_3 H_t - [\lambda_3 + \delta_3]Q_{3,t} \end{array} \right. \quad (2-1)$$

根据2-1

我们设 H_t 为在 t 时刻易感者与暴露者和感染者直接或间接接触的人数， T_t 为新感染人数，易感人群可以通过三种方式感染。首先可以在购买消费时与感染者接触，这些互动导致的新感染者人数为 $\Pi_1(S_t C_t^s)(I_t C_t^i)$ ， $(S_t C_t^s)$ 和 $(I_t C_t^i)$ 分别代表易感人群和感染者的总消费支出。参数 Π_1 既反应了购物时间，也反应了因该活动而感染的概率。其次，易感者和受感染者在工作中互动导致的新感染者人数由 $\Pi_2(S_t N_t^s)(I_t N_t^i)$ 。 $S_t N_t^s$ 和 $I_t N_t^i$ 分别代表易感人群和感染者的总工作时间。参数 Π_2 反应了因工作互动而感染的概率。第三，易感者和感染者还有除了消费和工作这些行为的见面方式，例如，与邻居乘坐电梯、路上散步接触等，这些接触导致 $\Pi_3 S_t I_t$ 的新感染者出现。

在 t 时刻易感者与暴露者和感染者直接或间接接触的人数由（2-2）给出：

$$H_t = \Pi_1(S_t C_t^s)(I_t C_t^i + A_t C_t^a) + \Pi_2(S_t N_t^s)(I_t N_t^i + A_t N_t^a) + \Pi_3 S_t(I_t + A_t) \quad (2-2)$$

设 T_t 为新出现的携带者：

$$T_t = \beta H_t \quad (2-3)$$

2.3 模型参数

已知城市对于密接人员采取 14 d 集中隔离，故设定 $\lambda_1 = \frac{1}{14}$ ，对于次密接人员采取 7 d 集中隔离，故设定 $\lambda_3 = \frac{1}{7}$ 。设 β 为易感者与感染者和暴露者接

触后携带病毒的概率，由于武汉疫情涉及的新型冠状病毒潜伏期较长，早期的人工干预措施力度较低且疫苗的覆盖范围有限，导致接触感染概率被高估，本文以某一城市 2022 年某一月份的数据作为训练集来训练新模型，将接触感染概率 β 从 2.05×10^{-9} 调整为 1×10^{-9} 。并且基于当前更多的原始数据对参数 q_s 、 δ_1 和 δ_3 进行拟合优化，从而提高模型预测的准确性。

对于参数 q_s 、 δ_1 和 δ_3 的设定，本文采用启发式算法。由于参数 q_s 表示表示入市隔离者在隔离的单位时间内筛查出感染者的概率，参数 β_1 表示密接者群体中单位时间里与感染个体接触并被传染的概率，参数 β_3 表示次密接者群体中单位时间里与感染个体接触并被传染的概率。故 q_s 、 δ_1 和 $\delta_3 \in [0, 1]$ 。本文对该范围进行随机采样，其中，设置 q_s 的数量级为 1×10^{-3} ， δ_1 和 δ_3 的粒度为 1×10^{-5} 。把 q_s 、 δ_1 和 δ_3 的采样过程进行迭代，设置迭代次数为 10000 次，并将其不同的样本带入修正 SEIR 动力学方程中进行求解，以均方根误差（root mean squared error, RMSE）最小为约束原则与真实数据进行对比，优化得到该粒度下的最优解参数。

涉及的其他相关参数 p_1 、 p_3 、 q_i 均通过真实数据计算可得。 p_1 为易感者变为密接者的概率， p_3 为易感者变为次密接者的概率， q_i 为入市隔离者在隔离的单位时间内筛查出易感者的概率。奥密克戎的潜伏期一般在 2~3 d，本文设定其被检测出阳性的时间均值为 3 d，我们可设定 $\varepsilon = \frac{1}{3}$ 。

第三章 效用偏好模型

在本节中，我们将介绍修正 SEIR 的偏好模型，并分析他们在流行病学模型中的理性行为。

3.1 各个类别的行为

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。设效用总和为：

$$U = \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t u(c_t, n_t) \quad (3-1)$$

在 (3-1) 中， $\beta \in (0, 1)$ 表示折扣系数， c_t 和 n_t 分别表示消费和工作时间。

为简单起见，我们采用以下效用函数来模拟个人从消费和工作中获得的效用：

$$u(c, n) = \ln c - \frac{\theta}{2} n^2 \quad (3-2)$$

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 $A * n$ ，这将是消费的上限，即 $n \leq An$ 。

参数 θ 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。如果一个人按照 n_0 的最优方式工作，那么他的劳动收入为 An_0 。由于效用函数在消费中严格单增，且所有劳动收入都应消费完，因此最优消费 $c_0 = An_0$ ，即 $\theta = \frac{1}{An_0^2}$ 。

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 $n_0 * L$ ，在给定封锁政策 L 的情况下，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。而对于易感者来说，他们的最佳工作时间可能严格小于允许的工作时间。

我们现在描述经济中不同类型人的优化问题。变量 U_t^j 表示时间 t 时 j 人

的终身效用 ($j = s, i, a, r$):

$$(1 + \mu_t)c_t^j = w_t\phi^j n_t^j + \Gamma_t \quad (3-3)$$

ϕ^j 表示管理劳动生产率的参数，对于易感者和康复者其等于 1，对于感染者其小于 1。

易感者的效用和由 (3-4) 表示：

$$U_t^s = u(c_t^s, n_t^s) + \beta[(1 - \tau_t)U_{t+1}^s + \tau_t U_{t+1}^i] \quad (3-4)$$

在这里，变量 τ_t 代表易感者被感染的概率：

$$\tau_t = \Pi_1 c_t^s(I_t C_t^i) + \Pi_2 n_t^s(I_t N_t^i) + \Pi_3 I_t \quad (3-5)$$

消费和工作时间的一阶条件是：

$$\begin{aligned} u_1(c_t^s, n_t^s) - (1 + \mu_t)\lambda_{bt}^s + \lambda_{\tau t}\pi_1(I_t C_t^i) &= 0 \\ u_2(c_t^s, n_t^s) + w_t\lambda_{bt}^s + \lambda_{\tau t}\pi_2(I_t N_t^i) &= 0 \end{aligned}$$

在这里， λ_{bt}^s 和 $\lambda_{\tau t}$ 分别是与约束 (3-3) 和 (3-4) 相关的拉格朗日乘数。

τ_t 的一阶条件是：

$$\beta(U_{t+1}^i - U_{t+1}^s) - \lambda_{\tau t} = 0 \quad (3-6)$$

感染者的效用和由 (3-7) 表示：

$$U_t^i = u(c_t^i, n_t^i) + \beta[(1 - \pi_r - \pi_d)U_{t+1}^i + \pi_r U_{t+1}^r] \quad (3-7)$$

消费和工作时间的一阶条件为：

$$\begin{aligned} u_1(c_t^i, n_t^i) &= \lambda_{bt}^i(1 + \mu_t) \\ u_2(c_t^i, n_t^i) &= -\phi^i w_t \lambda_{bt}^i \end{aligned}$$

康复者的效用和由 (3-8) 表示：

$$U_t^r = u(c_t^r, n_t^r) + \beta U_{t+1}^r \quad (3-8)$$

消费和工作时间的一阶条件为：

$$\begin{aligned} u_1(c_t^r, n_t^r) &= \lambda_{bt}^r (1 + \mu_t) \\ u_2(c_t^i, n_t^i) &= -w_t \lambda_{bt}^r \end{aligned}$$

3.2 带疫苗接种的控制模型

将 δ_v 代入易感者的效用和中，得到 (3-9)：

$$U_t^s = u(c_t^s, n_t^s) + (1 - \delta_v)\beta(1 - \tau_t)U_{t+1}^s + \delta_v(1 - \tau_t)\beta U_{t+1}^r + \tau_t\beta U_{t+1}^i \quad (3-9)$$

表明有概率 $1 - \delta_v$ 使一个在 t 时刻易感的人在 $t + 1$ 时刻没有被感染，这个人接种了疫苗对该疾病已经免疫。所以，在 $t + 1$ 时刻，这个人的健康状况与康复者相同，且疫苗不影响感染者或康复者的健康状况。

我们现在讨论疫苗接种对人口动态的影响。假设疫苗是在时间 t^* 时被发现，然后所有易感者都将变为康复者。没有易感者之后，也就没有传染者。

设时间 t^* 后易感者和康复者的数量为 S_{t^*}' 和 R_{t^*}' ：

$$\begin{aligned} S_{t^*}' &= 0 \\ R_{t^*}' &= R_{t^*} + S_{t^*} \end{aligned}$$

当 $t \geq t^*$ 时，我们有：

$$R_{t+1} = \begin{cases} R_t' + \pi_r I_t, & t = t^* \\ R_t + \pi_r I_t, & t > t^* \end{cases}$$

我们设在时间 t ，状态 X_t 和封锁策略 $L_t : \tau \in [t, T]$ ，康复者的最优行为 (c^r, n^r) ：

$$c_\tau^{r*} = An_0 L_\tau, n_\tau^{r*} = n_0 L_\tau, \tau = t, \dots, T.$$

同理可得传染者和易感者的最优行为 (c^i, n^i) 、 (c^{s*}, n^{s*}) ：

$$\begin{aligned} c_\tau^{i*} &= An_0 \phi L_\tau, n_\tau^{i*} = n_0 L_\tau, \tau = t, \dots, T. \\ c_\tau^{s*} &= An_\tau^{s*}, \tau = t, \dots, T. \end{aligned}$$

有了给定的封锁策略 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。

假设我们从时间 t_0 开始封锁政策，则这个最优控制方程的形式为：

$$\begin{aligned} \max_{L.} J^0(L.; t, X_t) &= \sum_{t=t_0}^T \beta^{t-t_0} [S_t u(c_t^{s*}, n_t^{s*}) + I_t u(c_t^{i*}, n_t^{i*}) + R_t u(c_t^{r*}, n_t^{r*})] \\ s.t. \quad L_t &\in [0, 1] \quad \forall t \in [0, T]. \end{aligned} \quad (3-10)$$

第四章 模型求解

4.1 求解方案

由于我们的模型结构良好，康复者和感染者的最优决策是可以忽略掉的，可以只求解易感人群的最优决策问题。

由于存在约束，我们很难得到一个确定的解，本文中，我们将每个时间点的最优控制视为带有消费和工作时间控制政策两个约束条件的静态优化，通过求解 KKT 条件来获得解。将最优控制 (c^*, n^*) 作为封锁策略 L 的函数，通过 MATLAB 工具箱 `fmincon` 的基于梯度的内点法，在高维空间 $[0, 1]^T$ 上优化。

4.2 模型参数

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一天，避免记录数据的延迟，可以显示流行病的变化。表4-1列出了数值实验中常用的参数和数值。

表 4-1 模型参数

变量	含义	值
π_1	消费对感染率的贡献	1.244887×10^{-6}
π_2	工作对感染率的贡献	1.0336×10^{-4}
π_3	其他活动对感染率的贡献	0.01759
π_r	感染者恢复的概率	0.78656
π_d	感染者死亡的概率	0.00033
n_0	满负荷工作时间	36.9
θ	消费函数和工作函数的效用权重	$\frac{1}{(36.9)^2}$
p_1	易感者成为密接者的转化率	0.000000235
p_3	易感者成为次密接者的转化率	0.00000003
λ_1	密接者转为易感者的转化率	$\frac{1}{14}$
λ_3	次密接者转为易感者的转化率	$\frac{1}{7}$
β	易感者的接触感染概率	0.000000001
ε	病毒携带者转化为感染者的速率	$\frac{1}{3}$
q_i	入市隔离者是易感者的概率	0.09
q_s	入市隔离者是感染者的概率	0.00287
δ_1	密接者中发现感染者的概率	0.00177
δ_3	次密接者中发现感染者的概率	0.00100

第五章 全文总结与展望

5.1 全文总结

我们扩展了 SEIR 模型来研究经济决策和流行病之间的相互作用。在我们的模型中，疫情对经济活动产生供需效应。我们为决策者在疫情造成的短期经济衰退与流行病的健康后果之间的权衡提供了参考意见。

致 谢

特别感谢王鸣晖老师对我的悉心指导，王老师渊博的专业知识、严谨负责的治学态度、精益求精的工作作风、无私奉献的为人风格和对科研深沉的热爱对我产生了深刻的影响，值得我终生思考和学习。从对科研是一无所知到初窥门径，王老师给予了无微不至的关心和竭尽全力的帮助，谨在此向他表达我最真挚的感谢和敬意。

感谢过往，展望未来。本人深知本论文还有许多不足之处，望老师批评指正！我也会继续努力！