

第三次作业

- 何泽欣 (18231070)
- 许卜仁 (18231111)
- 胡雪瑜 (18231094)

一种基于python元胞自动机的COVID-19在大不列颠岛流行情况的仿真方案

摘要

本文通过自主研发的python元胞自动机，对COVID-19在英国大不列颠岛的传播进行仿真。为此，模拟了人口在大不列颠岛的随机流动，将人的状态转移条件与人口间的相互接触联系起来，并探究了英国“群体免疫”策略的可行性。

关键词： 元胞自动机 SEIR模型 COVID-19

问题分析

本文通过元胞自动机仿真来得到长时间状态下COVID-19传播的可能稳定情况，进而分析治愈率、死亡率以及隔离措施对疫情传播的影响。为此，在第一问使用SEIR模型，配置不同的传染率参数，得到传染率与整个城市居民的感染人数之间的关系。第二问沿用第一问的模型，设定人口感染比例的临界值，低于最低临界值将被视为疾病基本消失，高于最大临界值被认为几乎所有人都会染病。在第三文中增加人的死亡状态，转变为SEIRD模型，并分析治愈率，死亡率，以及隔离措施对上面两个问题的影响。

主要影响因素：

- 总人口 P
- 接触率
- 易感者与一个感染者接触单位时间后成为潜伏者的概率 α_1
- 易感者与一个潜伏者接触单位时间后成为潜伏者的概率 α_2
- 潜伏者单位时间内变为感染者的概率 β
- 感染者单位时间内被治愈的概率 θ
- 感染者单位时间内死亡的概率 γ

文献综述：

文献[1]运用修正的SEIR传染病动力学模型对湖北省COVID-19疫情进行预测和评估。本文借鉴其中的经典SEIR模型并参考文献[1]中的模型参数。

假设

1. 在一个二维空间内，共有 P 个人，人口具有有明确的活动范围，人口在活动范围内随机流动。
2. 这 P 个人具有的状态可能为易感者 S ，潜伏者 E ，感染者 I ，免疫者 R 和死者 D
 - S 类，易感者 (Susceptible)，指未得病者，但缺乏免疫能力，与感染者或潜伏者接触后容易受到感染，初始状态下未感染或潜伏的人口皆为易感者；
 - E 类，潜伏者 (Exposed)，指接触过感染者，染上传染病，但无症状，处于潜伏期，具有传染性，可以传播给 S 类成员，将其变为 E 类成员；

- I 类，感染者 (Infectious)，指染上传染病且表现出症状的人，可以传播给 S 类成员，将其变为 E 类成员；
 - R 类，康复者 (Recovered)，指被隔离或因病愈而具有免疫力的人，状态不再改变；
 - D类，死者(Dead)，指染病而死的人，不再传染其他人。
3. 易感者接触潜伏者或感染者有可能被感染；潜伏者有概率变为感染者；感染者有概率自愈（成为免疫者），也有概率死亡（成为死者）。
4. 每个状态转移事件均为独立事件。

模型建立

SEIR传染病传播模型

假设在 $m \times n$ 的2维空间中，存在有效活动空间D，总人口P在D范围内活动

初始状态：所有人口均健康，为易感者S类，且随机分布在空间D中。

开始条件：随机抽取一人，使其感染疾病，转变为I类感染者

状态转移规则

1. 易感者

- 单位时间内每接触一个感染者，有 α_1 的概率变为潜伏者， $1-\alpha_1$ 的概率维持易感状态
- 单位时间内每接触一个潜伏者，有 α_2 的概率变为潜伏者， $1-\alpha_2$ 的概率维持易感状态
- 若单位时间内没有接触感染者或潜伏者，保持易感状态

2. 潜伏者

- 单位时间内有 β 的概率变为感染者，有 $1-\beta$ 的概率保持潜伏状态

3. 感染者

- 单位时间内有 θ 的概率变为治愈者有 $1-\theta$ 的概率保持感染者状态

4. 治愈者

- 保持治愈状态

状态转移过程如图所示

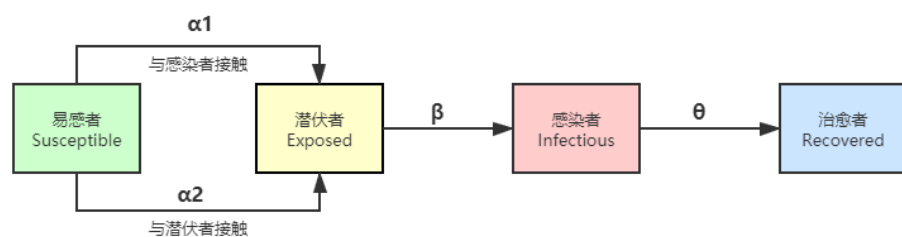


图1 SEIR状态转移图

接触的定义

采用 $R=1$ 的 Moore 邻域作为接触的判断标准，Moore 邻域数学表示如下

$$N = \{v_i = (v_i^x, v_i^y) | |v_i^x - v_0^x| \leq R, |v_i^y - v_0^y| \leq R, (v_i^x, v_i^y) \in z^2\}$$

若一人的邻域中存在其他人则视为接触

SEIRD传染病传播模型

与SEIR模型类似，唯一不同在于状态转移规则3

3. 感染者

- 单位时间内有 θ 的概率变为治愈者，有 γ 的概率变为死者，有 $1-\theta-\gamma$ 的概率保持感染者状态

状态转移过程如图所示

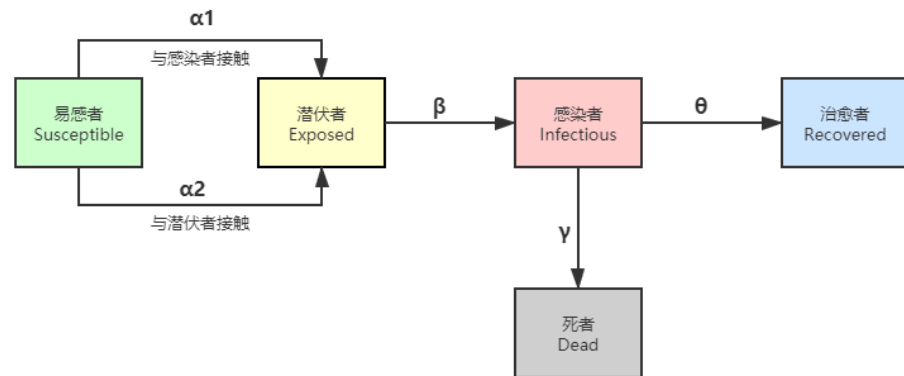


图2 SEIRD状态转移图

模型计算

伪代码：

输入：

未处理的大不列颠岛地图矩阵 $Map(x,y)$ ， x 为经度方向， y 为纬度方向

初始化：

配置参数：总迭代周期 t ，易感者被病人感染率 α_1 ，易感者被潜伏者感染率 α_2 ，治愈率 θ ，潜伏者转感染者率 β ，死亡率 γ

设定地图矩阵元素可能的状态：

- 不可达区域 $WALL=-1$
- 可达且无人区域 $NULL=0$
- 存在健康的人 $HEALTHY=1$
- 存在潜伏期的人 $INCUB=2$
- 存在病人 $SICK=3$
- 存在具有免疫的人 $IMMUNE=4$

- 预处理地图矩阵 Map ，将人可到达区域对应的值设置为 $NULL$ ，不可到达区域对应的值设置为 $WALL$
- 初始化地图矩阵 Map 的人口，随机将部分值为 $NULL$ 的元素修改为 $HEALTHY$
- 随机感染，随机将 Map 部分值为 $HEALTHY$ 的元素修改为 $INCUB$

过程：

- 随机移动： Map 上的人随机朝所在格子周围8个格子移动1次
- 状态转移：依据状态转移规则（参看“模型建立”部分），修改 $Map(x,y)$ 部分元素的值

输出：

包含各状态的人的地图矩阵Map(x,y)

模型计算流程

选取英国地图作为可活动区域（图片像素166*101，其中可活动区域占5371格），以表示所研究的群体免疫与英国相关。选取总人口 $P = 1000$ ，以求得到与人口位置精确度相匹配的接触率。

取依据论文[1]中的数据，对于第一问，设定参数 $\alpha_1 = 0.3$ ， $\alpha_2 = 0.3$ ， $\beta = 0.1$ ， $\theta = 0.1$ ， $\gamma = 0$

程序运行流程如下图所示

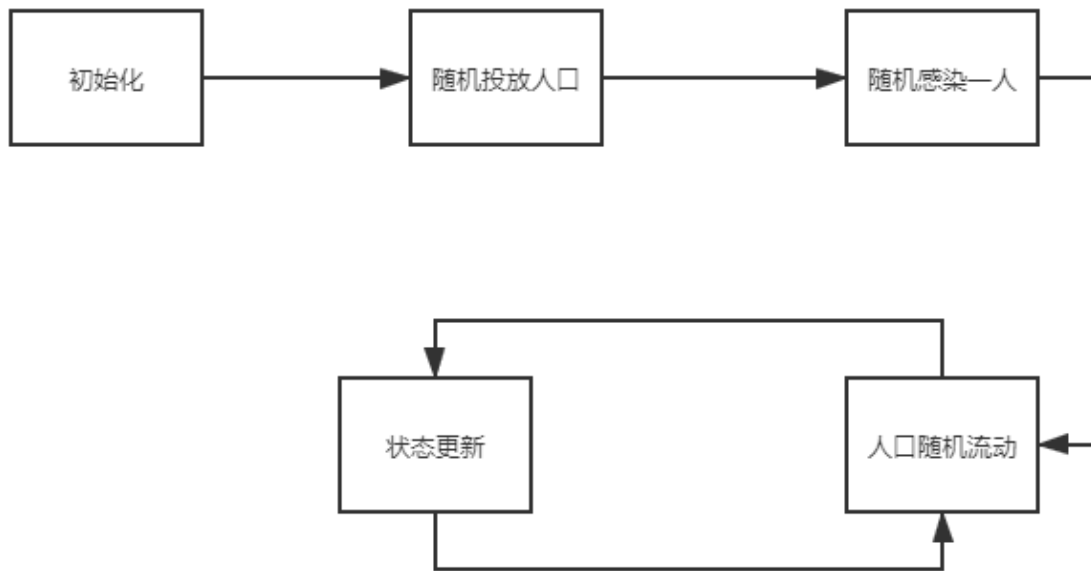


图3 python元胞自动机运行流程图

模型计算结果

1. 传染率(正常人被感染的概率)与整个城市居民的感染人数之间的关系：

随着时间的延长，会达到一个稳定的平衡态

当 $\theta = 0.025$ ， $\alpha_1 = 0.5$ ， $\alpha_2 = 0.5$ ， $\beta = 0.1$ ， $\gamma = 0.005$ 时 部分时刻程序运行截图如下

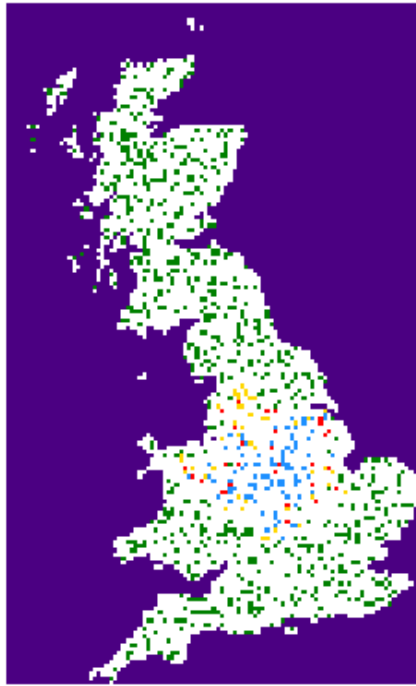


图4 python元胞自动机程序运行截图1 ($\theta=0.025$, $\alpha_1 = 0.5$, $\alpha_2 = 0.5$, $\beta = 0.1$, $\gamma=0.005$)

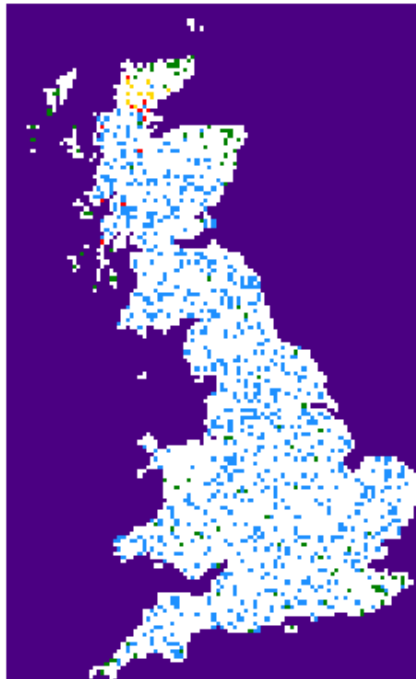


图5 python元胞自动机程序运行截图2 ($\theta=0.025$, $\alpha_1 = 0.5$, $\alpha_2 = 0.5$, $\beta = 0.1$, $\gamma=0.005$)

不同时间下各状态人数的折线图:

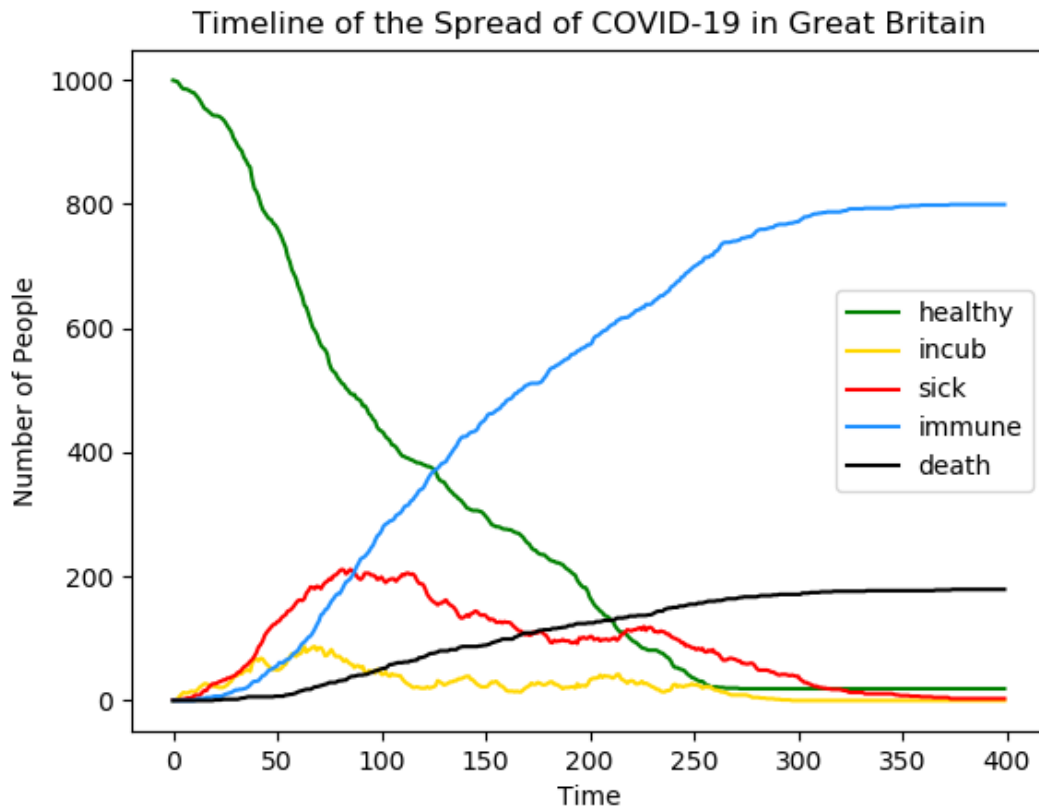


图6 各状态人口随时间变化曲线 ($\theta=0.025$, $\alpha_1 = 0.5$, $\alpha_2 = 0.5$, $\beta = 0.1$, $\gamma=0.005$)

最终各状态人数表格：

表1：稳定状态下各状态人口 ($\theta=0.025$, $\alpha_1 = 0.5$, $\alpha_2 = 0.5$, $\beta = 0.1$, $\gamma=0.005$)

healthy	incub	sick	immune	death
24	0	0	796	190

可以看出，当时间超过300个时间单位之后，进入稳定状态，所有人获得了对COVID-19的免疫力

2.几乎全部染病或者疾病基本消失的情况：

当 $\theta=0.025$, $\alpha_1 = 0.3$, $\alpha_2 = 0.3$, $\beta = 0.1$, $\gamma=0.005$ 时，几乎所有人染病

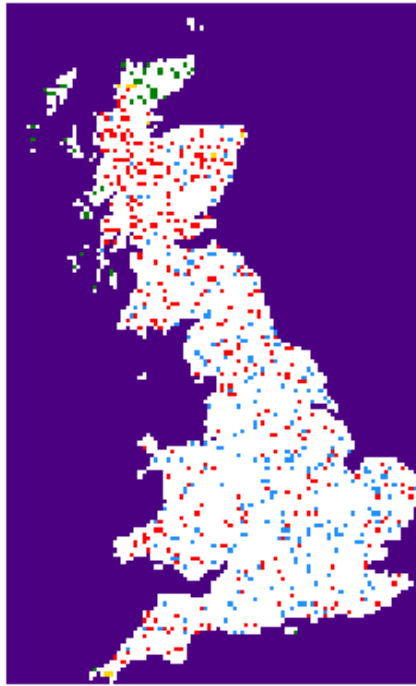


图7 python元胞自动机程序运行截图 ($\theta=0.025$, $\alpha_1 = 0.3$, $\alpha_2 = 0.3$, $\beta = 0.1$, $\gamma=0.005$)

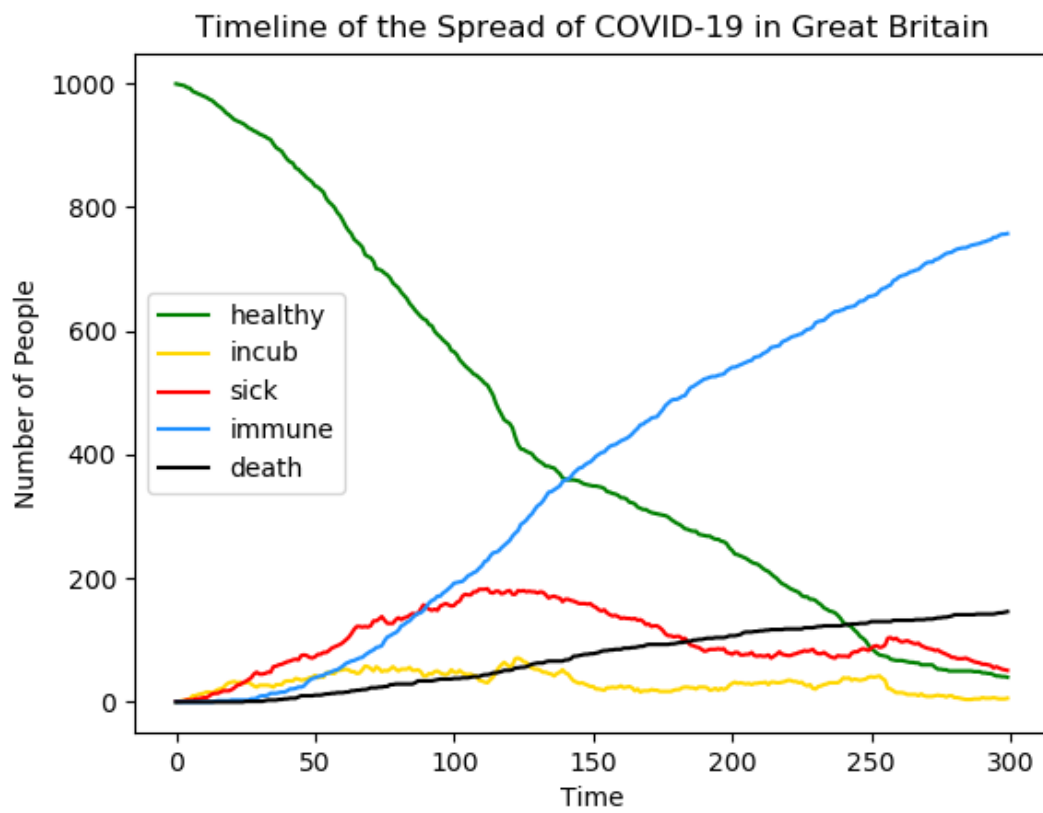


图8 各状态人口随时间变化曲线 ($\theta=0.025$, $\alpha_1 = 0.3$, $\alpha_2 = 0.3$, $\beta = 0.1$, $\gamma=0.005$)

300时间单位后各状态人数表格:

表2: 稳定状态下各状态人口 ($\theta=0.025$, $\alpha_1 = 0.3$, $\alpha_2 = 0.3$, $\beta = 0.1$, $\gamma=0.005$)

healthy	incub	sick	immune	death
35	0	40	770	155

当 $\theta=0.025$, $\alpha_1 = 0.02$, $\alpha_2 = 0.02$, $\beta = 0.1$, $\gamma=0.005$ 时, 疾病逐渐基本消失

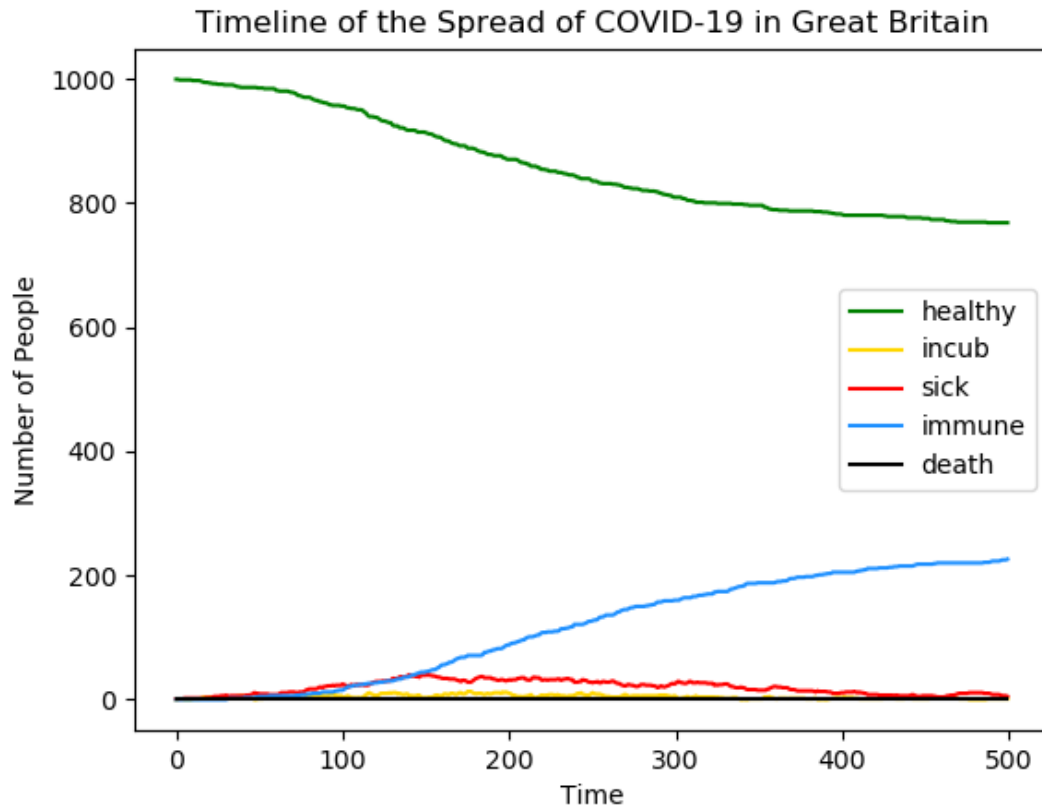


图9 各状态人口随时间变化曲线 ($\theta=0.025$, $\alpha_1 = 0.02$, $\alpha_2 = 0.02$, $\beta = 0.1$, $\gamma=0.005$)

最终状态人数表格:

表3: 稳定状态下各状态人口 ($\theta=0.025$, $\alpha_1 = 0.02$, $\alpha_2 = 0.02$, $\beta = 0.1$, $\gamma=0.005$)

healthy	incub	sick	immune	death
788	0	0	210	2

3.治愈率, 死亡率, 以及隔离措施对上面两个问题的影响:

假定发现了一种特效药, 将治愈率提高至 $\theta=0.1$ (原先的四倍)

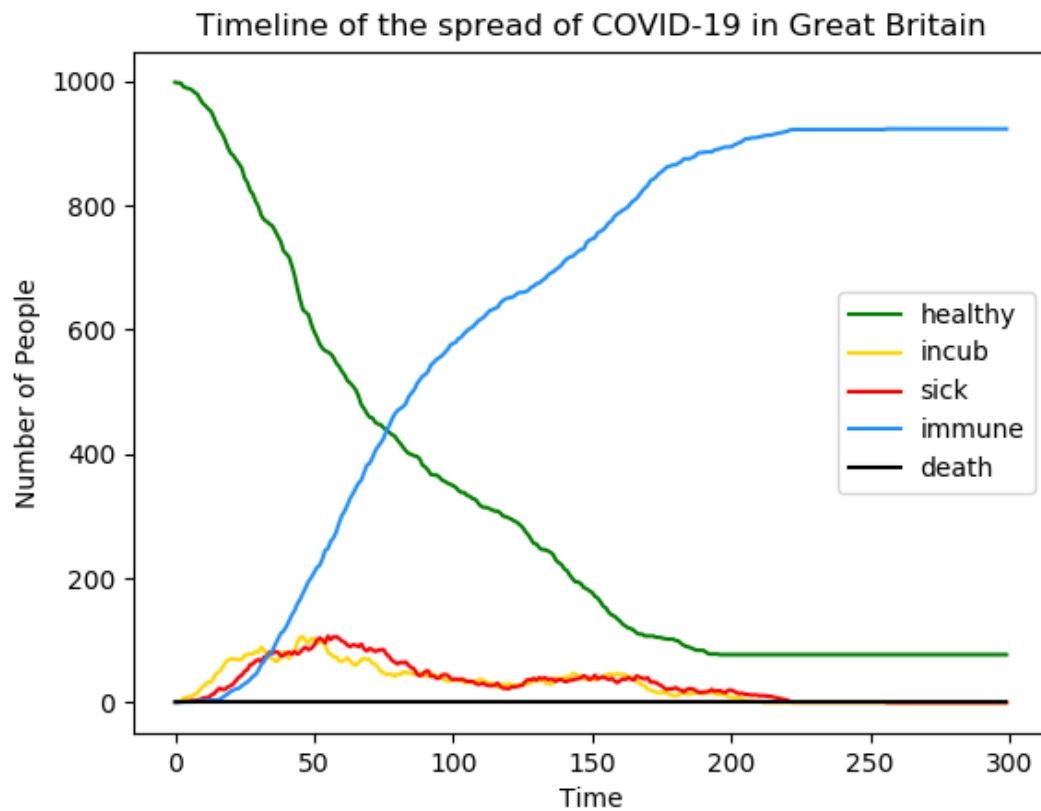


图10 各状态人口随时间变化曲线 ($\theta=0.1$, $\alpha_1 = 0.5$, $\alpha_2 = 0.5$, $\beta = 0.1$, $\gamma=0.005$)

那么，随着时间推移，同样地会进入稳定状态，但是得病人数的峰值会显著下降

同时，我们发现，在提高治愈率但不改变其他参数下，使得所有人感染或者疾病基本消失的传染率几乎不变，仍为0.3与0.02

假定临床采用新的治疗手段，使得COVID-19的致死率降为0

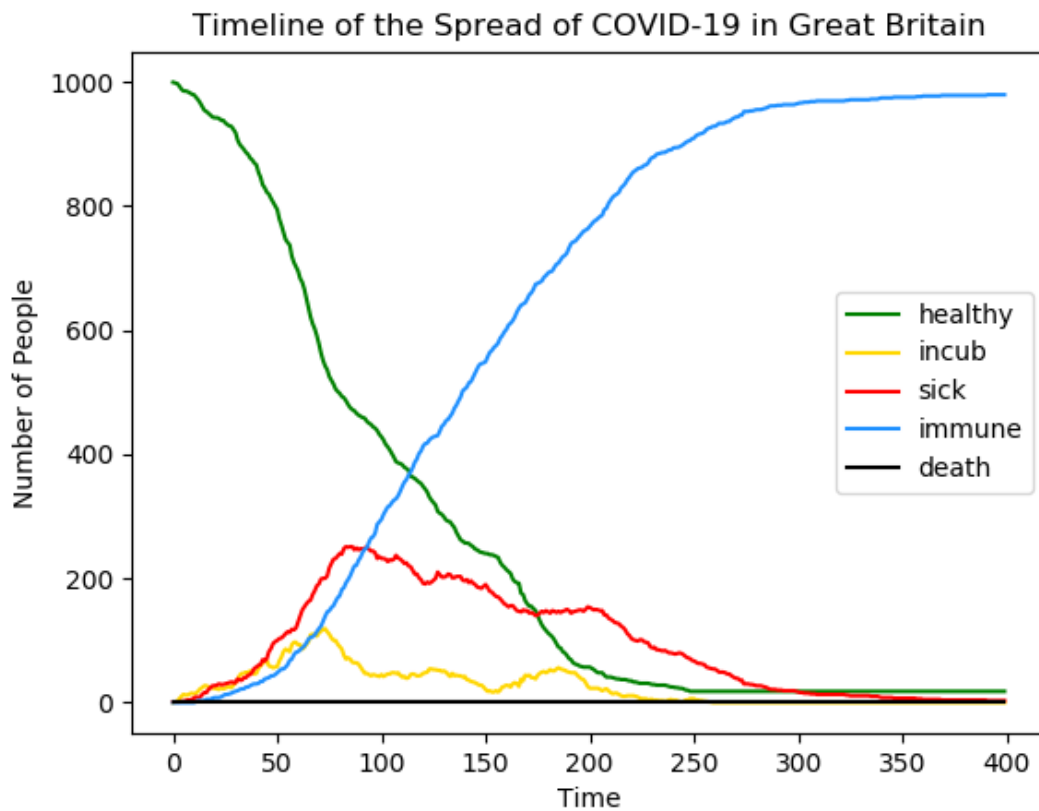


图11 各状态人口随时间变化曲线 ($\theta=0.1$, $\alpha_1 = 0.5$, $\alpha_2 = 0.5$, $\beta = 0.1$, $\gamma=0$)

则在500个时间单位内，感染人数反而会提高，符合致死率低反而利于传染的流行病学特征，而大部分人将逐渐获得免疫力，趋于稳定

使得所有人感染或者疾病基本消失的传染率几乎仍为0.3与0.02

假定采取隔离措施，降低感染率 α_1 与 α_2 从0.5降至0.2

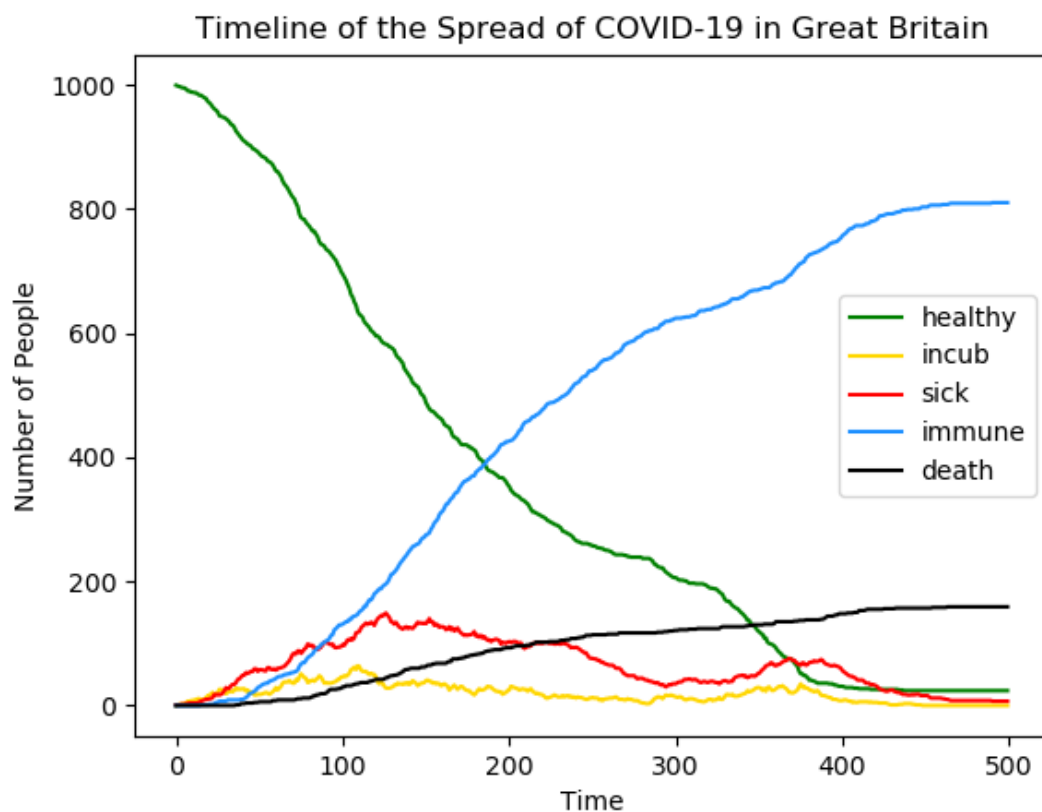


图12 各状态人口随时间变化曲线 ($\theta=0.1$, $\alpha_1 = 0.2$, $\alpha_2 = 0.2$, $\beta = 0.1$, $\gamma=0.005$)

在500个时间单位之后，几乎所有人获得了免疫力，进入了稳定态

同时，尽管隔离措施导致的感染率下降，但是在足够长的时间内，依然无法避免所有人被感染

参考文献

[1]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/OL].浙江大学学报(医学版):1-13[2020-04-01].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/33.1248.R.20200303.1722.004.html>.