

新冠疫情背景下北京冬奥会的风险评估：分析、模拟和预测

附件材料

附录 A:

一、传播率估计

根据所给疫情数据集，结合 4 月 7 日日本政府开始在国内实行紧急状态，可以认为 3 月 15 日到 4 月 9 日期间病毒在人群中自由传播，从而可以用经典 SEIR 模型去建模这 25 天内疫情的传播情况 [1]。该模型将所有人分为 4 种状态：易感者 (S)、暴露者 (E)、感染者 (I)、移除者 (R)，其中易感者是不携带抗体且不携带病毒的普通人群；暴露者是与感染者接触并携带病毒的群体，暴露者所处的这段时期亦称潜伏期，不具备传播病毒的能力；感染者是出现显性病理症状并具备传播病毒能力的群体，即发病群体；移除者是最后移除病毒的群体，在现实中包括痊愈并产生抗体和恶化并死亡两种情况，无论哪种情况，移除者最后都不可能再次被感染病毒。在总人口不变假设下，图 1 描述了各状态人群间的转移。



图 1 传统 SEIR 模型的状态转移

SEIR 模型的微分方程组形式为：

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = -\beta S(t) \frac{I(t)}{N} \\ \frac{dE}{dt} = \beta S(t) \frac{I(t)}{N} - \alpha E(t) \\ \frac{dI}{dt} = \alpha E(t) - \gamma I(t) \\ \frac{dR}{dt} = \gamma I(t) \end{cases} \quad (1)$$

β 、 α 、 γ 分别为传播率、发病率和移除率。传播率被描述为一个接触过感染者的易感者被感染的概率，发病率定义为潜伏期的倒数，移除率在这里也被称为恢复率，定义为感染期的倒数，这里取 $\alpha = 0.2$ [9]、 $\gamma = 0.1$ [2]。目标是利用 3 月 15 日到 4 月 9 日期间的日本疫情数据来拟合

传播率 β ，下面我们来构造优化目标。

基于论文 [3]，记时刻 t 新增感染人数的观测量为 $\Delta \hat{I}_s(t)$ ，下标 s 表示该量是一个随机变量，对应的样本值记为 $\Delta \hat{I}(t)$ 。使用 SEIR 模型可计算得到时刻 t 新增感染人数的理论值 $\Delta I(t)$ ，观测量与理论值的关系可表示为：

$$\Delta \hat{I}_s(t) = \Delta I(t) + \sqrt{\Delta I(t)} \varepsilon_s(t) \quad (2)$$

其中 $\varepsilon_s(t) \sim N(0,1)$ 服从标准正态分布， $\sqrt{\Delta I(t)} \varepsilon_s(t)$ 表示观测所附加的泊松噪声 [2]。同理，记时刻 t 累计感染人数的观测量为 $\hat{C}_s(t)$ ， $\hat{C}(t)$ 是对应的样本值，显然该时刻累计感染人数应该等于之前所有时刻的新增感染人数之和，即有：

$$\hat{C}_s(t) = \sum_{\tau=1}^t \Delta \hat{I}_s(\tau) \quad (3)$$

联立式(2)、(3)：

$$\hat{C}_s(t) = \sum_{\tau=1}^t \Delta I(\tau) + \sum_{\tau=1}^t \sqrt{\Delta I(\tau)} \varepsilon_s(\tau) \quad (4)$$

记 $C(t) = \sum_{\tau=1}^t \Delta I(\tau)$ ，显然 $C(t)$ 是通过 SEIR 模型计算得到的累计感染人数的理论值，其微分方程项为：

$$\frac{dC}{dt} = \alpha E(t) \quad (5)$$

同时令 $Y_s(t) = \sum_{\tau=1}^t \sqrt{\Delta I(\tau)} \varepsilon_s(\tau)$ ，显然 $Y_s(t) \sim N(0, C(t))$ ，表示观测的累加噪声。由此可以得到式(6)：

$$\hat{C}_s(t) = C(t) + Y_s(t) \quad (6)$$

式(6)左边为观测值（实际数据），右边为理论值，通过改变参数使理论值逼近观测值，我们即可得到模型的最优参数。

基于以上推导可构造优化目标：

$$\beta_s^* = \underset{0 < \beta < 1}{\operatorname{argmin}} J_s(\beta) \quad (7)$$

其中

$$J_s(\beta) = \sum_{t=1}^{25} [\hat{C}_s(t) - C(t) - Y_s(t)]^2 \quad (8)$$

β_s^* 是参数 β 的估计量，且估计量 β_s^* 服从正态分布 [4]； $\hat{C}_s(t)$ 、 $C(t)$ 分别表示累计感染人数的观测量和理论值， $Y_s(t)$ 为观测的累加噪声。将日本国内前 25 天累计感染人数数据作为 $\hat{C}_s(t)$ 的样本值 $\hat{C}(t)$ 代入式(8)，并使用 Adam 优化器优化式(7)得到参数 β 的估计值 β^* 。迭代一万次可得到图 2 (a)所示 β_s^* 的分布。取 β 最终的估计值 0.28918（95%置信度），拟合效果见图 2(b)。

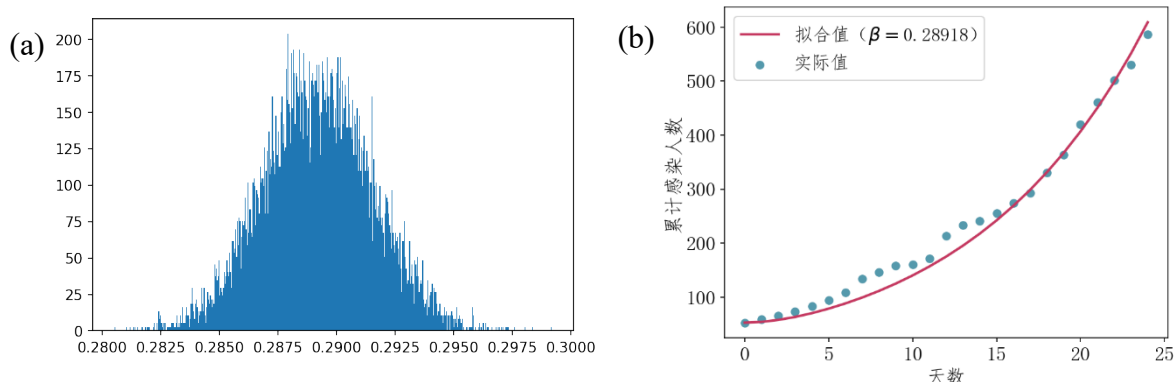


图 2 a 图展示了估计量 β_s^* 的分布；b 图展示了 β 取 0.29 时的拟合效果

二、参数定义与解释

表 1 奥运村传播模型各参数定义

参数	定义	值	来源	备注
N	奥运村总人数	2.1×10^4	[5]	—
β	基础感染率	0.29	一、传播率 估计	取 0.95 置信区间
β_1	修正后的暴露者 传播率	$\frac{\beta}{12}$	本文假设	12 为平均接触人数
β_2	修正后的感染者 传播率	$0.5\beta_1$	[5]	0.5 为比例系数
α	发病速率	0.2	[6]	取潜伏期 5.1 天的倒数
t_0	响应时间	7	本文假设	平均潜伏期+2 天

r_1	反应期后每人每日接触人数	-	本文假设	其值在实验中调整
$r(t)$	每人每日接触人数	$\begin{cases} 11 & t < t_0 \\ r_1 & t \geq t_0 \end{cases}$	本文假设	-
γ_1	反应期后感染者被移除速率	-	本文假设	其值在实验中调整
$\gamma(t)$	感染者被移除速率	$\begin{cases} 0.07 & t < t_0 \\ \gamma_1 & t \geq t_0 \end{cases}$	[7]	取自然恢复率、因病死亡率和被发现速率三者的最大值，

三、模型再生数的简要推导

在均匀混合传染病模型中，基本再生数和有效再生数是两个重要的计算量。基本再生数的物理含义为：传染病传播初期，一个感染者进入易感人群后继发感染的数量；有效再生数的物理含义为：传染病传播过程中，单个感染者引起的继发感染数量。基本再生数在数学上被严格定义为传播方程组下一代矩阵的谱半径，其值乘以当前时刻易感者的比例即为有效再生数 [8]。为简化其过程并明确其物理意义，我们用一种更加简单、过程更清晰的方式引出奥运村传播模型的基本再生数及有效再生数，其值与根据定义所得完全一致。

1. 有效再生数

SEIR 奥运村传播模型由式 1 微分方程组所描述：

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = -\beta_1 r(t) S(t) \frac{E(t)}{N} - \beta_2 r(t) S(t) \frac{I(t)}{N} \\ \frac{dE}{dt} = \beta_1 r(t) S(t) \frac{E(t)}{N} + \beta_2 r(t) S(t) \frac{I(t)}{N} - \alpha E(t) \\ \frac{dI}{dt} = \alpha E(t) - \gamma(t) I(t) \\ \frac{dR}{dt} = \gamma(t) I(t) \end{cases} \quad (9)$$

考虑反应时刻后 ($t > t_0$) 奥运村中疫情处于临界状态，此时日新增感染人数不变，即有：

$$\frac{dI}{dt} = 0 \quad (10)$$

$$I(t) = I^* \quad (11)$$

其中 I^* 是临界状态的日新增感染人数稳态值。将式(10)、式(11)代入式(9)的第三个式子可得：

$$E(t) = \frac{\gamma_1 I^*}{\alpha} = E^* \quad (12)$$

根据式(3)可知，此时日新增潜伏者人数 $E(t) = E^*$ 也为一常数，此时可知 $\frac{dE}{dt} = 0$ ，将其代入式(9)的第二个式子，得到：

$$\left(\frac{\beta_1}{\alpha} + \frac{\beta_2}{\gamma_1}\right) r_1 s(t) = 1 \quad (13)$$

其中 $s(t) = \frac{S(t)}{N}$ 表示易感者比例。令

$$\mathfrak{R}(t) = \left(\frac{\beta_1}{\alpha} + \frac{\beta_2}{\gamma_1}\right) r_1 s(t) \quad (14)$$

容易验证当 $\mathfrak{R}(t) < 1$ 时， $\frac{dI}{dt} < 0$ ，村中感染者数量持续走低，反之当 $\mathfrak{R}(t) > 1$ 时，其值不断升高。结合经典的 SEIR 模型，我们可将 $\mathfrak{R}(t)$ 定义为改良的 SEIR 模型的有效再生数，1 为传播临界值。

2. 基本再生数

有效再生数 $\mathfrak{R}(t)$ 的大小描述了时刻 t 后疫情的走势，该数不仅与反应时刻后接触人数和反应时刻后移除速率相关，还与当前易感者比例 $s(t)$ 有关。然而我们注意到，由于奥运村的防护等级较高，反应时刻 t_0 通常不会太大，相应时刻的疫情规模极小，即此时 $I(t_0)$ 、 $E(t_0)$ 的值极小，且有 $S(t_0) \approx S(0) \approx N$ ，故有：

$$\mathfrak{R}(t) \approx \left(\frac{\beta_1}{\alpha} + \frac{\beta_2}{\gamma_1}\right) r_1 \quad (15)$$

若防疫措施足够有力，使得 $\mathfrak{R}(t) < 1$ ，则 $I(t)$ 、 $E(t)$ 会进一步下降，由式(6)的第一个式子可知 $\left|\frac{dS}{dt}\right|$ 极小，进而易感者人数 $S(t)$ 的下降可以忽略不计，从而仍然保持 $\mathfrak{R}(t) < 1$ 。将以上情况迭代，我们可以发现，反应时刻若有 $\mathfrak{R}(t_0) < 1$ ，在后续相当长的时间内都有式(12)成立。也即：若反应时刻 $t = t_0$ 后最初的一段时间内日新增感染人数呈下降趋势，则在可见的后续时间段内均保持下降趋势；若反应时刻后的措施不够有力，则有 $\mathfrak{R}(t_0) > 1$ ，此时 $S(t)$ 下降较为剧烈，导致式(15)不再成立，疫情走势由当前易感者比例 $s(t)$ 决定。这里我们仍然借用经典 SEIR 模型中的概念，记：

$$\mathfrak{R}_0 = \left(\frac{\beta_1}{\alpha} + \frac{\beta_2}{\gamma_1}\right) r_1 \quad (16)$$

定义 \mathfrak{R}_0 为改良 SEIR 模型的基本再生数。显然 \mathfrak{R}_0 与时刻 t 无关，仅与表示反应时刻后的防

防疫措施强度参数 r_1 、 γ_1 有关。

四、行为状态的实现细节

在网格空间中，我们定义了 5 个不同的候选速度矢量 $(1,0)$ 、 $(0,1)$ 、 $(-1,0)$ 、 $(-1,-1)$ 、 $(0,0)$ ，每个时间步个体的位置计算公式为： $t+1$ 时刻的位置 = t 时刻的速度矢量 + t 时刻的位置，示意见图 3。行为状态之间的区别在于其速度矢量的生成方式不同，下面具体介绍个行为状态的实现细节。

散步：每一时刻个体从 4 个候选速度矢量中随机选取一个作为当前时刻的速度矢量。

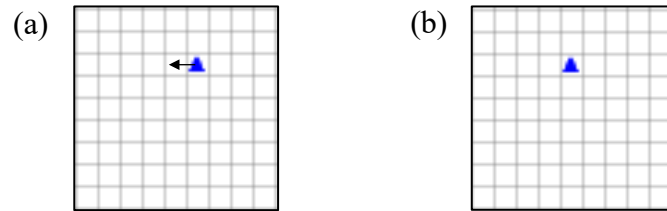


图 3 个体在模拟空间中的行动示意图， t 时刻（a 图）的速度矢量为 $(-1,0)$ ，则 $t+1$ 时刻（b 图）个体向左横向移动一格

追踪：该状态下个体有一个追踪点，其目的是到达该追踪点。为实现追踪功能，每一个时间步系统会计算个体到追踪点的距离矢量，并联合上一个时间步的速度矢量生成当前时间步的速度矢量，生成方式见图 4。具体来说，当距离矢量与速度矢量的夹角小于 90 度时，速度矢量不变；当距离矢量与速度矢量的夹角等于 90 度时，将速度矢量向距离矢量方向旋转 90 度；当距离矢量与速度矢量的夹角大于 90 度时，速度矢量反向。上述规则可以使个体在追踪目标时，

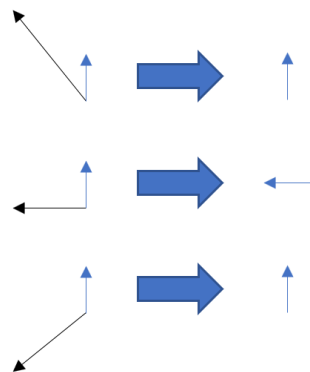


图 4 追踪状态下速度矢量的计算方式，粗箭头左边的细黑箭头与细蓝箭头分别为当前时刻的距离矢量与上一时刻的速度矢量，粗箭头右边的细蓝箭头为生成的当前时刻的速度矢量

在保证相互距离不断减小的情况下尽量走直线。

避障：个体速度矢量方向存在障碍物时触发，该状态实际上是一种特殊的追踪行为，其追踪点设置在障碍物周围以实现避障，具体细节见图 5。

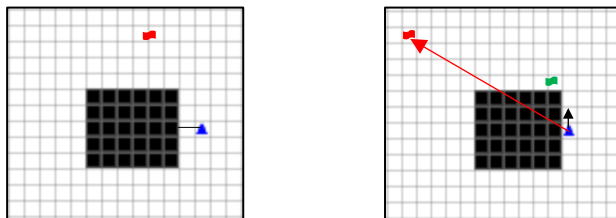


图 5 遇到障碍物时个体（蓝色三角）的行为模式，黑色箭头表示速度矢量，在 t 时刻（左图）个体向左移动以接近终点 1（左图红色旗帜），在 $t+1$ 时刻遇到障碍物（若干个黑色方块组成），系统计算个体到终点 1 的距离矢量（右图红色箭头），并据此在建筑物周围生成终点 2（右图绿色旗帜）进行追踪，从而避开障碍物

驻留：个体速度矢量置为 $(0,0)$ 。

躲避：当个体前进方向存在其他个体时触发躲避状态。如图 6 所示：当个体下一步预到达的格子内有其他个体时，个体速度矢量置为 $(0,0)$ 的同时保存上一次移动的速度矢量，在该时间段内若预到达格子中的其他个体离开，则个体移动到预到达格子并解除躲避状态；否则在等待结束后，个体将上一次移动的速度矢量随机向顺时针或逆时针旋转 90° 并进行移动。

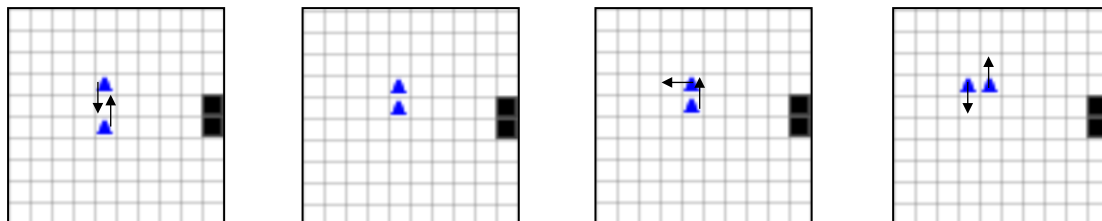


图 6 个体相遇时的行为模式，从左到右时间步依次递增，黑色箭头为每一时间步的速度矢量，注意，对于左 3 子图来说，由于上面的个体先向左移动导致原格子空白，从而下面的个体会直接移动到该格子中

模拟过程中一个个体往往具有多个候选的行为状态，根据环境的不同会激发不同的行为状态。由于环境的复杂性，经常会出现这样一种情况：个体的一个行为状态还未结束，却被激发了另外的行为状态（如在避障过程中遭遇到其他个体而触发躲避状态）。为保证各行为状态的有序性，我们对每个个体使用栈来记录其行为状态。借用正文的个体行为示例图，我们追踪其行为状态栈以演示其工作方式（图 7）。具体来说，当个体受环境影响而被激发某一行为状态时，该行为状态会被压入个体的行为状态栈中作为栈顶元素，

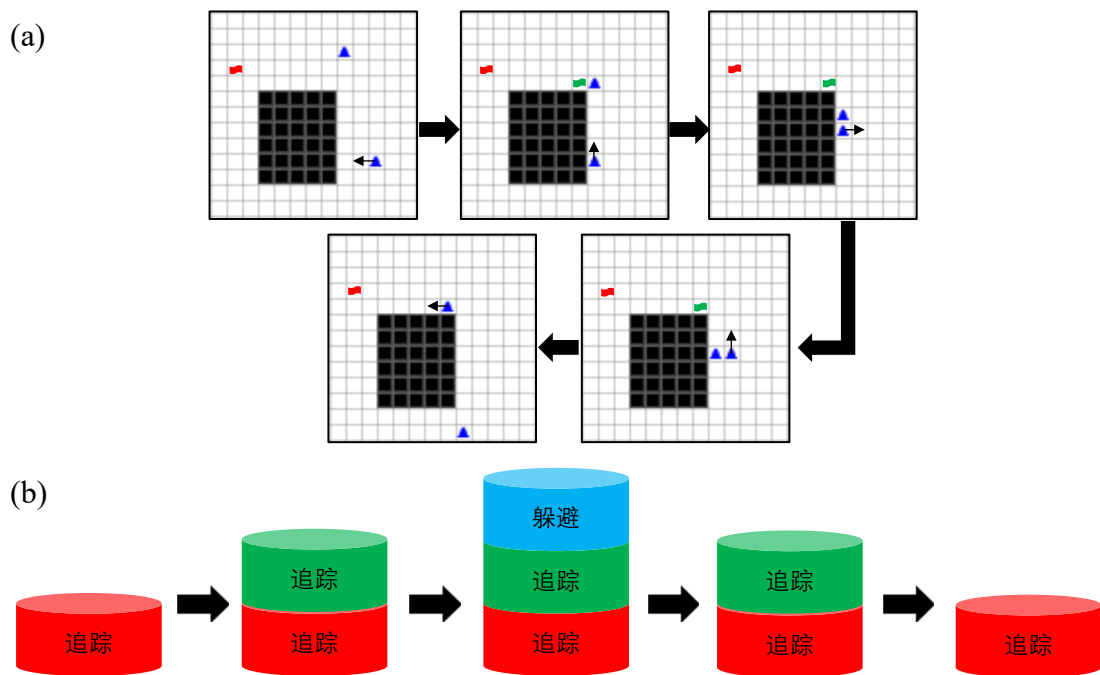


图 7 多行为状态演示和行为状态栈变化图，图中演示了个体（延伸黑色箭头以作为当前时刻的速度矢量）的行为模式（a 图）及对应的行为状态栈（b 图），状态栈中红色的“追踪”状态追踪红色旗帜，绿色的“追踪”状态追踪绿色旗帜

个体当前的行为受行为状态栈的栈顶元素控制；当该行为状态结束时，将该行为状态弹出，个体的行为模式继续由当前栈顶的行为状态控制，从而保证了在多个行为模式叠加时个体行为的有序性。

附录 B:

完整数据已上转至 github (<https://github.com/DDMXIE/BDSC2021-Results>), 以下附录提供数据与结果的概览。

一、各参赛国疫情相关数据

	iso_code	continent	location	date	total_cases	new_cases	new_cases_smoothed	total_deaths	new_deaths	new_deaths_smoothed	...
0	AFG	Asia	Afghanistan	2020/2/24	1.0	1.0	NaN	NaN	NaN	NaN	...
1	AFG	Asia	Afghanistan	2020/2/25	1.0	0.0	NaN	NaN	NaN	NaN	...
2	AFG	Asia	Afghanistan	2020/2/26	1.0	0.0	NaN	NaN	NaN	NaN	...
3	AFG	Asia	Afghanistan	2020/2/27	1.0	0.0	NaN	NaN	NaN	NaN	...
4	AFG	Asia	Afghanistan	2020/2/28	1.0	0.0	NaN	NaN	NaN	NaN	...
...
94852	ZWE	Africa	Zimbabwe	2021/6/6	39189.0	21.0	35.000	1606.0	1.0	1.714	...
94853	ZWE	Africa	Zimbabwe	2021/6/7	39238.0	49.0	39.571	1611.0	5.0	2.429	...
94854	ZWE	Africa	Zimbabwe	2021/6/8	39321.0	83.0	46.143	1617.0	6.0	2.571	...
94855	ZWE	Africa	Zimbabwe	2021/6/9	39432.0	111.0	57.286	1622.0	5.0	3.286	...
94856	ZWE	Africa	Zimbabwe	2021/6/10	39496.0	64.0	57.714	1626.0	4.0	3.143	...

图 8 各参赛国疫情数据概览

二、东京奥运会舆情相关数据

	news_title	news_content	news_source	news_pubtime	news_url
0	About 10,000 volunteers for the Tokyo Olympics...	The departures were the latest sign of opposit...	New York Times	2021/6/3	https://www.nytimes.com/2021/06/03/world/asia/...
1	The Tokyo Olympics, Explained	After a year's delay, the Tokyo Summer Olympic...	New York Times	2021/4/6	https://www.nytimes.com/article/olympics-tokyo...
2	Australia's softball players are among the fir...	The team will be confined to one floor of a ho...	New York Times	2021/6/1	https://www.nytimes.com/2021/06/01/world/asia/...
3	Japan extends a state of emergency until one m...	With infections still high, restrictions in ni...	New York Times	2021/5/28	https://www.nytimes.com/2021/05/28/world/asia/...
4	Putting Women on More Equal Footing at the Oly...	Almost half of the athletes this year will be ...	New York Times	2021/5/28	https://www.nytimes.com/2021/05/28/sports/olym...
...
13968	Tokyo converts Olympics public-viewing site to...	Tokyo officials said a public-viewing event fo...	Washington Times	2021/6/1	https://www.washingtontimes.com/news/2021/jun/...
13969	Japan's vaccine push ahead of Tokyo Olympics l...	The Olympics risk becoming an incubator for "a...	Denver Post	2021/6/1	https://www.denverpost.com/2021/06/01/japan-co...
13970	Olympic athletes to sign waiver acknowledging ...	All athletes competing in the Tokyo Olympics m...	Irish Independent	2021/6/1	https://www.independent.ie/sport/other-sports/...
13971	The show must go on	The Australian national handball team arrives ...	Korea Joongang Daily	2021/6/1	https://koreajoongangdaily.joins.com/2021/06/0...
13972	Badminton team aim for gold in every event at ...	Korea will contest all five badminton events a...	Korea Joongang Daily	2021/6/1	https://koreajoongangdaily.joins.com/2021/06/0...

图 9 英文舆情数据概览

	news_title	news_content	news_source	news_pubtime	news_url
0	東京五輪 一部聖火ランナーの走行市町が決まる / 岐阜	4月4、5日に県内で実施される東京2020オリンピック聖火リレーで、県実行委員会は7日、一部...	毎日新聞	2020/3/8	https://mainichi.jp/articles/20200308/dtl/k21/...
1	東京2020オリンピック聖火リレーの走行時間 / 奈良	◆東京2020オリンピック聖火リレーの走行時間(目安) u3000【11日】(1) 9:10~...	毎日新聞	2021/4/11	https://mainichi.jp/articles/20210411/dtl/k29/...
2	聖火リレー、警備訓練 盛岡で県警 一連の動作確認 / 岩手	聖火リレーが県内で6月16日~18日に行われるのを前に県警は21日、盛岡市の盛岡競馬場で警備...	毎日新聞	2021/5/22	https://mainichi.jp/articles/20210522/dtl/k03/...
3	書籍で五輪盛り上げる 岡山市立中央図書館展示 / 岡山	2021年に延期された、'・パラリンピックを盛り上げようと、岡山市立中央図書館で書籍の企...	毎日新聞	2020/8/23	https://mainichi.jp/articles/20200823/dtl/k33/...
4	聖火リレー 観覧者募集 出発式・セレブレーション / 滋賀	県は、5月27、28日に県内で実施される、'聖火リレーの出発式と聖火の到着を祝うイベント...	毎日新聞	2021/4/22	https://mainichi.jp/articles/20210422/dtl/k25/...
...
12639	滋賀) 武豊騎手、「しがスपोर्टス大使」に就任	2018年には史上初の通算4千勝を達成するなど、数々の記録を残している。 JRAのレースは、...	asahi_digital	2020/3/22	https://www.asahi.com/articles/ASN3P7D17N3LPTJ...
12640	(しつもん! ドラえもん: 3616) せいか編	東京五輪(とうきょうりん)の聖火(せいか)リレーで、第(だい)1走者(そうしゃ)を務(つ...	asahi_digital	2020/3/21	https://www.asahi.com/articles/DA3S14411069.html
12641	(しつもん! ドラえもん: 3615) せいか編 こたえ	福島県(ふくしまけん) 東京五輪(とうきょうりん)は2011年(ねん)の東日本大震災(ひ...	asahi_digital	2020/3/20	https://www.asahi.com/articles/DA3S14409542.html
12642	バレーのテストマッチは中止	日本バレー協会は16日、4月21~26日に予定していた男女日本代表のテストマッチを中止する...	asahi_digital	2020/3/17	https://www.asahi.com/articles/DA3S14405064.html
12643	鈴木リカルドが初優勝 テコンドー・全日本選手権	テコンドーの全日本選手権は24日、大分県中津市のダイハツ九州アリーナで行われ、男子68キ...	asahi_digital	2020/2/25	https://www.asahi.com/articles/DA3S14378491.html

图 10 日文舆情数据概览

	news_title	news_content	news_source	news_pubtime	news_sentiment
0	强调男女平等原则 石川佳纯成为东京奥运会宣誓候选人	东京奥运会在即，开幕式宣誓代表人选目前仍未完全确定。东京奥运会基于男女平等的原则，正在探讨由...	新传宽频	2021-01-01	0.0
1	朝鲜退出东京奥运会 影响几何?或致朝美关系陷入僵局_中华明法网 www.zhmingfa.com	梦见自己当律师给自己辩护朝鲜退出东京奥运会 影响几何?或致朝美关系陷入僵局_中华明法网 www...	科技资讯	2021-04-06	0.0
2	日官员称东京奥运举办可能性极大 将探讨观众入场_中华明法网 www.zhmingfa.com	苏州打官司最有名的律师日官员称东京奥运举办可能性极大 将探讨观众入场_中华明法网 www.z...	国内新闻网	2021-04-13	0.0
3	Shams: 哈登承诺将参加东京奥运, 携手杜兰特并肩作战	中国体育6月22日讯, 据知名记者Shams报道, 篮网球星哈登已经承诺将参加东京奥运会, 届时他...	新传宽频	2021-01-01	0.0
4	哔哩哔哩专栏	随着疫情的原因导致2020东京奥运会延期举办, 同时这也是首届进行延期的奥运会。直到2021年...	哔哩哔哩	2021-04-01	0.0
...
3791	#东京奥运会赛程场地敲定#从奥运会可能取消到推迟一年举办, 东京奥运会经历了一段让人难以忘记的...	#东京奥运会赛程场地敲定#从奥运会可能取消到推迟一年举办, 东京奥运会经历了一段让人难以忘记的...	懂车帝	2020-07-18	0.0
3792	要推迟了! 中国女足能否拿下最后一张入场券? 入驻2021东京奥运会!	说起中国足球, 读者都默认是中国男足, 不要忘了, 还有一个中国女足在这里。可绝大多数人都选择性...	腾讯新闻网	2020-07-19	0.0
3793	东京奥运刘诗雯冲击首金! 许昕身兼三项没问题, 14天决定5金归属	就在昨日晚间国际奥委会公布了明年东京奥运会的具体赛程, 乒乓球比赛持续时间较长共14天, 东京奥...	懂车帝	2020-07-18	0.0
3794	女排“假球队”有诡计? 中国女排要当心被害, 东京奥运前途凶险	明年的东京奥运会是中国女排球员心目中最大的梦想, 如果能够在东京奥运会上夺得冠军, 中国女排将书...	百家号	2020-07-19	1.0
3795	东京奥运会比赛日程确定 具体什么时候举办?	[#东京奥运会比赛日程和场地已敲定#: 为期17天 共设33个大项339个小项比赛]今天, 东京...	深港在线	2020-07-18	0.0

图 11 中文舆情数据概览

三、各国基本再生数估计

表 2 各国基本再生数

index	country	left	right	middle	R0
0	Afghanistan	0.38132	0.381862	0.381591	3.81591
1	Albania	0.680402	0.680612	0.680507	6.805068
2	Algeria	0.606688	0.60703	0.606859	6.068592
3	Andorra	0.743392	0.743648	0.7435352	7.435203
4	Angola	0.392328	0.392866	0.392597	3.925967
5	Anguilla	0.006544	0.008007	0.007276	0.072756
6	Antigua And Barbuda	0.329182	0.3298	0.329491	3.294912
7	Argentina	0.942553	0.94273	0.942642	9.426416
8	Armenia	0.794916	0.795153	0.795034	7.950344
9	Aruba	0.47472	0.475042	0.474881	4.748812
10	Australia	0.347429	0.347707	0.347568	3.475681
11	Austria	1	1	1	10
12	Azerbaijan	0.555704	0.556081	0.555892	5.558923
13	Bahamas	0.470857	0.471306	0.471082	4.710816
14	Bahrain	0.547489	0.547662	0.547576	5.475757
15	Bangladesh	0.376436	0.376758	0.376597	3.76597
16	Barbados	0.474862	0.475182	0.475022	4.75022
17	Belarus	0.593304	0.593656	0.59348	5.934803
18	Belgium	0.5	0.5	0.5	5
19	Belize	0.364825	0.365399	0.365112	3.65112
20	Benin	0.422278	0.422787	0.422532	4.225324
21	Bermuda	0.422994	0.423351	0.423172	4.231722
22	Bhutan	0.07557	0.080176	0.077873	0.778728
23	Bolivia	0.559641	0.559905	0.559773	5.597728
24	Bosnia And Herzegovina	0.691489	0.691691	0.69159	6.9159
25	Botswana	0.243679	0.244108	0.243893	2.438934
26	Brazil	0.986356	0.986582	0.986469	9.864689
27	British Virgin Islands	0.020844	0.023778	0.022311	0.223112
28	Brunei Darussalam	0.708043	0.708324	0.708184	7.081835
29	Bulgaria	0.754271	0.754453	0.754362	7.54362
30	Burkina Faso	0.827108	0.827331	0.82722	8.272195
31	Burundi	0.16546	0.166123	0.165792	1.657916
32	Cabo Verde	0.27301	0.273702	0.273356	2.733558
33	Cambodia	0.5	0.5	0.5	5
34	Cameroon	0.551765	0.552036	0.551901	5.519009
35	Canada	0.280186	0.280452	0.280319	2.803188
36	Caribbean Netherlands	0.08349	0.084377	0.083933	0.839333

index	country	left	right	middle	R0
37	Cayman Islands	0.467619	0.468076	0.467848	4.678476
38	Central African Republic	0.243847	0.244606	0.244227	2.442265
39	Chad	0.327453	0.328069	0.327761	3.277608
40	Channel Islands	0.727884	0.728152	0.728018	7.280179
41	Chile	1	1	1	10
42	China	0.557458	0.560685	0.559071	5.590712
43	China Hong Kong Sar	0.092429	0.092584	0.092507	0.925067
44	China Macao Sar	3.58E-09	5.00E-09	4.29E-09	4.29E-08
45	Colombia	1	1	1	9.999998
46	Comoros	0.566056	0.566416	0.566236	5.662361
47	Congo	0.500175	0.500602	0.500389	5.003887
48	Costa Rica	0.8291	0.829319	0.829209	8.292094
49	Cote D Ivoire	0.785472	0.78571	0.785591	7.855913
50	Croatia	0.639273	0.639588	0.63943	6.394304
51	Cuba	0.614379	0.614572	0.614476	6.144759
52	Curacao	0.32073	0.321357	0.321043	3.210432
53	Cyprus	0.715892	0.716085	0.715988	7.159885
54	Czech Republic	0.90417	0.90428	0.904225	9.042248
55	Democratic Republic Of The Congo	0.681582	0.681874	0.681728	6.817284
56	Denmark	1	1	1	10
57	Djibouti	0.714083	0.714351	0.714217	7.142167
58	Dominica	0.378585	0.379148	0.378867	3.788668
59	Dominican Republic	0.822913	0.823129	0.823021	8.230213
60	Ecuador	1	1	1	10
61	Egypt	0.507321	0.507733	0.507527	5.07527
62	El Salvador	0.672695	0.672997	0.672846	6.728463
63	Equatorial Guinea	0.372494	0.373063	0.372779	3.727788
64	Eritrea	0.489985	0.490421	0.490203	4.902028
65	Estonia	0.843896	0.844108	0.844002	8.440022
66	Ethiopia	0.495929	0.496358	0.496144	4.961438
67	Faeroe Islands	0.71571	0.715988	0.715849	7.158491
68	Falkland Islands Malvinas	0.339295	0.33991	0.339603	3.396027
69	Fiji	0.361065	0.361648	0.361357	3.613566
70	Finland	0.5	0.5	0.5	5
71	France	0.731409	0.731508	0.731459	7.314586
72	French Guiana	0.256926	0.257248	0.257087	2.570872
73	French Polynesia	0.502839	0.503265	0.503052	5.030518
74	Gabon	0.399632	0.40016	0.399896	3.998956
75	Gambia	0.173805	0.174703	0.174254	1.742539
76	Georgia	0.513447	0.513861	0.513654	5.136539
77	Germany	0.615415	0.615504	0.61546	6.154595

index	country	left	right	middle	R0
78	Ghana	0.660649	0.660868	0.660759	6.607585
79	Gibraltar	0.452123	0.452581	0.452352	4.523516
80	Greece	0.935115	0.935297	0.935206	9.352061
81	Greenland	0.321362	0.322	0.321681	3.216808
82	Grenada	0.355813	0.356402	0.356107	3.561074
83	Guadeloupe	0.711658	0.711943	0.7118	7.118002
84	Guatemala	0.571146	0.571516	0.571331	5.71331
85	Guinea	0.641914	0.642222	0.642068	6.420679
86	Guinea Bissau	0.419003	0.419361	0.419182	4.191824
87	Guyana	0.5	0.5	0.5	5
88	Haiti	0.373902	0.374293	0.374097	3.740973
89	Holy See	0.161943	0.163339	0.162641	1.626411
90	Honduras	0.659288	0.659506	0.659397	6.593971
91	Hungary	0.703281	0.703482	0.703382	7.033816
92	Iceland	0.944144	0.944322	0.944233	9.442327
93	India	0.5	0.5	0.5	5
94	Indonesia	0.883225	0.883363	0.883294	8.83294
95	Iran	0.5	0.5	0.5	5
96	Iraq	0.695555	0.69584	0.695697	6.956973
97	Ireland	1	1	1	10
98	Isle Of Man	0.78325	0.783495	0.783372	7.833724
99	Israel	0.774156	0.774395	0.774275	7.742752
100	Italy	1	1	1	10
101	Jamaica	0.521124	0.521531	0.521328	5.213276
102	Japan	0.289138	0.289232	0.289185	2.89185
103	Jordan	0.734565	0.734827	0.734696	7.346962
104	Kazakhstan	0.717486	0.717588	0.717537	7.17537
105	Kenya	0.698015	0.698296	0.698155	6.981554
106	Kuwait	0.442183	0.442396	0.44229	4.422895
107	Kyrgyzstan	0.662303	0.662439	0.662371	6.623713
108	Laos	0.298391	0.298856	0.298624	2.986237
109	Latvia	0.774831	0.775072	0.774952	7.749517
110	Lebanon	0.639236	0.639557	0.639397	6.393965
111	Lesotho	0.114481	0.1162	0.11534	1.153402
112	Liberia	0.389136	0.389665	0.389401	3.894008
113	Libya	0.511694	0.51211	0.511902	5.11902
114	Liechtenstein	0.54426	0.54465	0.544455	5.444549
115	Lithuania	0.401264	0.401812	0.401538	4.015379
116	Luxembourg	1	1	1	10
117	Macedonia	0.557347	0.557719	0.557533	5.575331
118	Madagascar	0.484963	0.48522	0.485092	4.850915

index	country	left	right	middle	R0
119	Malawi	0.296189	0.296573	0.296381	2.963811
120	Malaysia	0.209485	0.209708	0.209597	2.095967
121	Maldives	0.2797	0.280193	0.279947	2.799468
122	Mali	0.629204	0.629433	0.629318	6.293184
123	Malta	0.548145	0.548369	0.548257	5.482572
124	Marshall Islands	0.049898	0.056006	0.052952	0.52952
125	Martinique	0.509455	0.509751	0.509603	5.096032
126	Mauritania	0.221333	0.222128	0.22173	2.217303
127	Mauritius	0.658285	0.658466	0.658376	6.583756
128	Mayotte	0.727261	0.727531	0.727396	7.273961
129	Mexico	0.5	0.5	0.5	5
130	Micronesia	4.10E-11	4.60E-11	4.35E-11	4.35E-10
131	Moldova	0.836353	0.836569	0.836461	8.36461
132	Monaco	0.384405	0.384951	0.384678	3.846776
133	Mongolia	0.344302	0.344896	0.344599	3.44599
134	Montenegro	0.693475	0.693681	0.693578	6.935781
135	Montserrat	0.272757	0.273459	0.273108	2.73108
136	Morocco	0.769318	0.76956	0.769439	7.694391
137	Mozambique	0.425095	0.425588	0.425341	4.253414
138	Myanmar	0.466404	0.466723	0.466563	4.665634
139	Namibia	0.259132	0.259643	0.259388	2.593876
140	Nepal	0.5	0.5	0.5	5
141	Netherlands	1	1	1	10
142	New Caledonia	0.298897	0.299379	0.299138	2.99138
143	New Zealand	0.58401	0.584361	0.584186	5.841858
144	Nicaragua	0.256055	0.256783	0.256419	2.564195
145	Niger	0.926583	0.926765	0.926674	9.266741
146	Nigeria	0.401892	0.402407	0.40215	4.021495
147	Norway	1	1	1	10
148	Oman	0.371783	0.372173	0.371978	3.719781
149	Pakistan	0.790434	0.790598	0.790516	7.905162
150	Panama	1	1	1	10
151	Papua New Guinea	1.15E-05	1.67E-05	1.41E-05	0.000141
152	Paraguay	0.562177	0.562554	0.562365	5.623653
153	Peru	0.5	0.5	0.5	5
154	Philippines	0.5	0.5	0.5	5
155	Poland	1	1	1	10
156	Portugal	1	1	1	10
157	Qatar	0.95489	0.955069	0.95498	9.549798
158	Reunion	0.85251	0.852724	0.852617	8.526169
159	Romania	0.843222	0.843435	0.843328	8.433285

index	country	left	right	middle	R0
160	Russia	0.5	0.5	0.5	5
161	Rwanda	0.661518	0.661831	0.661675	6.616747
162	Saint Barthelemy	0.098543	0.100538	0.099541	0.995405
163	Saint Helena	0.0337	0.037912	0.035806	0.35806
164	Saint Kitts And Nevis	0.254206	0.254721	0.254463	2.544634
165	Saint Lucia	0.33452	0.335132	0.334826	3.348257
166	Saint Martin	0.113305	0.114415	0.11386	1.1386
167	Saint Pierre And Miquelon	4.47E-11	5.07E-11	4.77E-11	4.77E-10
168	Saint Vincent And The Grenadines	0.02245	0.027051	0.02475	0.247503
169	Samoa	0.026635	0.030482	0.028558	0.285581
170	San Marino	0.735086	0.735356	0.735221	7.352213
171	Sao Tome And Principe	0.012537	0.014626	0.013581	0.135815
172	Saudi Arabia	1	1	1	10
173	Senegal	0.629579	0.629904	0.629742	6.297416
174	Serbia	1	1	1	9.999998
175	Seychelles	0.214097	0.214668	0.214383	2.143825
176	Sierra Leone	0.565556	0.565922	0.565739	5.65739
177	Singapore	0.099436	0.099599	0.099518	0.995176
178	Sint Maarten	0.518107	0.518514	0.518311	5.183106
179	Slovakia	0.850243	0.850455	0.850349	8.503489
180	Slovenia	0.985832	0.986064	0.985948	9.859482
181	Solomon Islands	0.1771	0.17801	0.177555	1.775552
182	Somalia	0.274597	0.275292	0.274945	2.749447
183	South Africa	1	1	1	10
184	South Korea	0.897753	0.897798	0.897776	8.977756
185	South Sudan	0.366593	0.367171	0.366882	3.668817
186	Spain	0.449279	0.451625	0.450452	4.504519
187	Sri Lanka	0.5	0.5	0.5	5
188	State Of Palestine	0.33128	0.331512	0.331396	3.313961
189	Sudan	0.5	0.5	0.5	5
190	Suriname	0.302475	0.303123	0.302799	3.027989
191	Swaziland	0.296995	0.297661	0.297328	2.973283
192	Sweden	0.5	0.5	0.5	5
193	Switzerland	1	1	1	10
194	Syria	0.448907	0.449382	0.449144	4.491443
195	Taiwan	0.128989	0.129245	0.129117	1.291173
196	Tajikistan	0.750324	0.750389	0.750356	7.503563
197	Tanzania	0.432475	0.432972	0.432724	4.327238
198	Thailand	0.063397	0.063728	0.063562	0.635624
199	Timor Leste	0.003678	0.004774	0.004226	0.04226
200	Togo	0.43376	0.434252	0.434006	4.34006

index	country	left	right	middle	R0
201	Trinidad And Tobago	0.658831	0.659143	0.658987	6.58987
202	Tunisia	0.704734	0.705006	0.70487	7.048702
203	Turkey	1	1	1	10
204	Turks And Caicos Islands	0.299587	0.300255	0.299921	2.999208
205	UK	0.811092	0.811321	0.811207	8.112068
206	USA	0.533751	0.533861	0.533806	5.33806
207	Uganda	0.566348	0.566721	0.566534	5.665343
208	Ukraine	0.754558	0.754799	0.754679	7.546786
209	United Arab Emirates	0.285831	0.286145	0.285988	2.85988
210	Uruguay	0.659978	0.660136	0.660057	6.60057
211	Uzbekistan	0.667586	0.667736	0.667661	6.676609
212	Vanuatu	4.55E-11	5.16E-11	4.85E-11	4.85E-10
213	Venezuela	0.622237	0.622476	0.622357	6.223568
214	Viet Nam	0.053389	0.054157	0.053773	0.53773
215	Wallis And Futuna Islands	4.24E-11	4.78E-11	4.51E-11	4.51E-10
216	Western Sahara	0.043163	0.044571	0.043867	0.438674
217	Yemen	0.241754	0.242529	0.242142	2.421415
218	Zambia	0.412006	0.412373	0.412189	4.121894
219	Zimbabwe	0.34645	0.34704	0.346745	3.467451

四、LSTM 感染人数预测

选用以 LSTM 为构成组件的序列生成模型并基于第二部分所提及的疫情数据集预测各个国家的疫情走向。原始数据集中收集的每个国家疫情数据从 2020 年 2 月 15 日到 2021 年 8 月 31 日共 564 天，首先对数据集的 3 列特征(“daily new infections”、“new infected cases per million”、“total infected cases”)进行小波去噪；其次使用时间步长为 120 的滑动窗口将原始数据集划分为训练集和验证集，将前 70%作为训练集训练模型，中间 10%作为验证集寻找最佳参数，最后 20%数据作为测试集检验模型的预测能力。模型输入为前 90 天的特征，输出为未来 30 天的感染人数预测。训练时，使用根均方误差作为损失函数，在 python3.6、pytorch-1.7.1GPU 版环境下运行代码，优化算法选用 Adam。各国的感染人数预测结果见图 32。

	Albania	Algeria	Andorra	Argentina	Armenia	Australia	Austria	Azerbaijan	Belarus	Belgium	...	Thailand
0	911.425876	493.537728	8.314115	4587.438850	461.783915	753.894026	1270.218083	3025.509278	1184.800604	2601.767248	...	6304.912999
1	893.568161	449.666986	7.922972	4570.026664	474.527911	705.056908	1280.490540	3253.727747	1204.681341	2597.331879	...	2881.403187
2	880.615259	402.882093	7.474655	4608.191668	489.163457	632.139575	1295.581850	3680.426937	1225.583394	2596.681362	...	263.967193
3	868.875337	368.307725	7.070558	4979.803825	504.369251	562.856143	1316.495143	3682.158977	1238.541753	2601.270332	...	1630.028066
4	860.002539	344.507216	6.733123	5366.181202	519.455244	507.360957	1344.171716	3479.226793	1245.079449	2614.831322	...	13.925919
...
175	649.279393	564.242270	50.860683	10710.925414	763.465387	194.842491	2757.163331	1888.712236	1412.352698	4022.541344	...	156.470023
176	648.340895	529.541591	50.770749	10705.043200	757.556753	191.798127	2749.848754	1877.764897	1413.689383	3980.967615	...	158.716608
177	647.386481	483.505232	50.742747	10709.356354	753.778279	190.044799	2745.862496	1875.390753	1415.094410	4004.754928	...	160.270499
178	646.383338	431.597554	50.763233	10719.753605	751.720004	187.992366	2744.235479	1879.388166	1416.379343	4053.709056	...	161.213664
179	645.279689	456.855885	50.812966	10731.033876	750.783163	184.173241	2743.642605	1886.705547	1417.309314	4089.475735	...	161.668545

图 12 各国 LSTM 估计结果概览

参考文献

- [1] Bentout, S., Chekroun, A., & Kuniya, T. Parameter estimation and prediction for coronavirus disease outbreak 2019 (COVID-19) in Algeria. *AIMS Public Health*, 2020, 7(2): 306.
- [2] Sun, H., Qiu, Y., Yan, H., Huang, Y., Zhu, Y., & Chen, S. X. Tracking and predicting COVID-19 epidemic in China mainland. *medRxiv*. 2020.
- [3] Kuniya, T. (2020). Prediction of the epidemic peak of coronavirus disease in Japan. *Journal of clinical medicine*, 2020, 9(3): 789.
- [4] Capaldi, A., Behrend, S., Berman, B., Smith, J., Wright, J., & Lloyd, A. L. Parameter estimation and uncertainty quantification for an epidemic model. *Mathematical biosciences and engineering*, 2012, 553.
- [5] Zhu, W., Feng, J., Li, C., Wang, H., Zhong, Y., Zhang, X., & Zhang, T. COVID-19 risk assessment for the Tokyo Olympic Games. *medRxiv*. 2021.
- [6] Lauer, S. A., Grantz, K. H., Bi, Q., Jones, F. K., Zheng, Q., Meredith, H. R., ... & Lessler, J. The incubation period of coronavirus disease 2019 (COVID-19) from publicly reported confirmed cases: estimation and application. *Annals of internal medicine*, 2020, 172(9): 577-582.
- [7] Bhapkar, H. R., Mahalle, P. N., Dey, N., & Santosh, K. C. Revisited COVID-19 mortality and recovery rates: are we missing recovery time period? *Journal of Medical Systems*, 2020, 44(12): 1-5.
- [8] Van den Driessche, P., & Watmough, J. Reproduction numbers and sub-threshold endemic equilibria for compartmental models of disease transmission. *Mathematical biosciences*, 2002, 180(1-2): 29-48.