
新型冠状病毒的疫情评估与预测报告

(数据截至日期 2020 年 2 月 3 日)

撰写单位：北京航空航天大学

计算机学院智慧城市（BIGSCity）课题组

经管学院数据智能（DIG）课题组

<https://www.bigscity.com>

撰写日期：2020 年 2 月 5 日

报告撰写组成员

王静远 北京航空航天大学，副教授

吴俊杰 北京航空航天大学，教 授

撰写组研究生

建模数据分析 林鑫、冯恺、其勒格日

在线系统开发 鲁聃、潘达岩、贾焕庭

数据收集整理 葛谨鸣、刘欣锐

目录

1. 报告说明	4
2. 武汉市总体疫情评估预测	6
2.1 基本传染数 (R_0) 分析	6
2.2 新增确诊数量预测分析	6
2.3 疫情缓解与趋势分析	7
3. 湖北省（不含武汉市）总体疫情评估预测	8
3.1 基本传染数 (R_0) 分析	8
3.2 新增确诊数量预测分析	8
3.3 疫情缓解与趋势分析	9
4. 全国（不含湖北省）总体疫情评估预测	10
4.1 基本传染数 (R_0) 分析	10
4.2 新增确诊数量预测分析	11
4.3 疫情缓解与趋势分析	12
5. 全国主要城市基本传染系数与传染估算	14
北京市	14
郑州市	15
兰州市	16
南昌市	17
合肥市	18
石家庄市	19
天津市	20
上海市	21
成都市	22
广州市	23
南京市	24
福州市	25
乌鲁木齐市	26
重庆市	27
长沙市	28
深圳市	29
济南市	30
温州市	31
参考文献	34

1. 报告说明

自 2019 年 12 月在武汉发现第一批新型冠状病毒感染者以来，该病毒在短时间内在武汉以及国内其他省份中快速传播，并且在海外也很快出现了较多感染者。该病毒的发展已经严重影响到了人们的日常工作与生活，政府也相应地采取了一系列措施来对病毒的传播进行控制。针对这一疫情，本报告使用公开数据，进行了三个方面的疫情分析：

- 1、对全国主要城市病毒传播的基本传染数 R_0 进行估算，并通过 R_0 的变化趋势分析疫情发展的趋势。
- 2、使用 SEIR 模型进行疫情建模，实现对未来 3 日全国及主要城市确诊人数进行预测，并预测疫情发展的拐点时间和疫情结束时间。
- 3、计算疫情缓解指数，通过和历史疫情比对，分析疫情相较前一个时期的缓解情况。

报告相关信息在线获取地址：<http://www.ncov-report.com/>

主要结论

根据数据分析可以看出，无论从全国还是地方来看，目前 nCov 病毒的危险程度还比较高。武汉市的 7 日 R_0 均值为 3.3，全国（不含湖北省）的 7 日 R_0 均值为 3.0，都处于较高水平。全国和武汉的 R_0 均呈现下降趋势，武汉下降明显（斜率为 -0.32），全国有少量下降（斜率为 -0.02）。

长期来看，除湖北省外，全国大部分主要城市疫情有一定程度缓解。以 1 月 28 日数据为基准，模型估计的全国缓解程度为 37.55%。全国疫情预计会在 12 天以后迎来拐点，疫情预计会在 169 天后结束。但从缓解指数看，武汉市及湖北省其他地区的疫情仍有加重的可能。

截至 2020 年 2 月 3 日 24 时，全国疫情建模分析与预测汇总如下：

城市名	当日 R_0	R_0 变化率	R_0 7日平均	次日确诊增长预测	疫情拐点预测	疫情结束预测	缓解指数
武汉市	2.9	-0.32	3.3	485	23日后	170日后	-8.97%
湖北_不含武汉	3.0	-0.02	3	840	12日后	169日后	-15.69%
全国_不含湖北	2.7	-0.02	3	692	12日后	169日后	37.55%
北京市	3.0	-0.05	2.9	18	9日后	166日后	27.97%
郑州市	2.6	-0.14	3.2	6	79日后	98日后	12.70%
兰州市	3.6	-0.09	3	2	103日后	122日后	22.06%
南昌市	2.6	0.06	3.2	14	12日后	67日后	1.66%
合肥市	2.7	-0.05	2.9	9	12日后	85日后	5.65%
石家庄市	2.1	-0.35	2.6	1	17日后	170日后	14.21%
天津市	2.0	-0.22	3	6	61日后	72日后	17.50%
上海市	3.0	0.06	3	20	13日后	170日后	14.19%
成都市	2.0	-0.10	2.9	7	10日后	140日后	20.00%
广州市	3.2	0.00	3.2	23	118日后	169日后	7.84%
南京市	3.0	0.03	3.1	5	56日后	68日后	4.96%
福州市	2.4	-0.16	2.5	5	129日后	169日后	-10.36%
乌鲁木齐市	2.2	-0.14	2.5	1	127日后	169日后	16.71%
重庆市	3.0	-0.07	2.9	27	147日后	169日后	27.29%
长沙市	2.6	0.06	2.9	17	12日后	131日后	5.54%
深圳市	2.8	0.20	3.1	36	12日后	169日后	-1.01%
济南市	2.3	-0.09	2.9	3	12日后	57日后	19.99%
温州市	2.1	-0.01	3.3	40	12日后	169日后	2.68%

名词解释：

- **基本传染数 (R_0)**：指在没有外力介入的情况下，一个感染者会把疾病传染给其他多少个易感者的平均数。若 $R_0 < 1$ 传染病将会逐渐消失，若 $R_0 > 1$ 传染病会以指数方式散布。该指数可以作为评价当前传染病的严重程度与传播强度的参考。
- **R_0 变化率**：指过去 7 日 R_0 的变化的总体趋势，即线性拟合的斜率。
- **次日确诊增长预测**：指对数据截至日期次日确诊病例的预测，该预测使用 SEIR 数据对近 7 日数据模拟后得出。
- **疫情拐点时间预测**：指每日新增确诊人数开始下降的时间点，即疫情拐点，通常表明疫情增长开始放缓。该预测使用 SEIR 数据对近 7 日数据模拟后得出。
- **疫情结束时间预测**：指累计感染人数曲线达到最大值的时间点，此后不再有确诊病例增加，疫情进入消化历史病患的扫尾期。该预测使用 SEIR 数据对近 7 日数据模拟后得出。
- **缓解指数**：指使用最新数据更新模型参数后，模型估计的疫情感染数量峰值相比初始阶段估计的感染数量峰值的下降比例。缓解指数描述了模型对当前状态下疫情的评估乐观程度，当缓解指数为正时，表明模型预计的最大感染数正在下降。该指数通过比对当日 SEIR 模型预测结果和使用前一阶段数据得到的模型预测结果获得。

数据来源：

本报告采用的疫情数据来自中华人民共和国国家卫生健康委员会公布的确诊 2019-nCov 病例数据，时间范围从 2020 年 1 月 15 日 0 时到 2020 年 2 月 3 日 24 时。本报告使用的城市初易感人群数据来自 2017《中国城市统计年鉴》中的“全市年末户籍人口信息”。报告数据来源全部为公开数据，其目的是为疫情防控和分析提供参考。

免责声明：

报告中的分析和预测结果基于 2020 年 2 月 3 日 24 时前的相关数据，仅代表根据该日期前的疫情控制情况，预测结果仅供参考。考虑到防控措施的不断加强，模型的预测结果可能会高估真实疫情。

本报告基于公开疫情数据，通过公开论文中的传染病模型得到。报告结论仅作为研究参考，非官方结论。发布者不对报告结果和结论的准确性负责。

2. 武汉市总体疫情评估预测

2.1 基本传染数 (R_0) 分析

主要结论: 武汉市作为病毒爆发源, 确诊感染人数占了全国的 30% 左右, 根据 R_0 的值来看, 也在全国中处于较高水平, 已有明显下降的趋势 (斜率为-0.32)。

基本传染数 R_0 概况与趋势: 过去 7 天的基于武汉市数据的 R_0 数值变化如下图所示, 均值为 3.3, 斜率为-0.32。

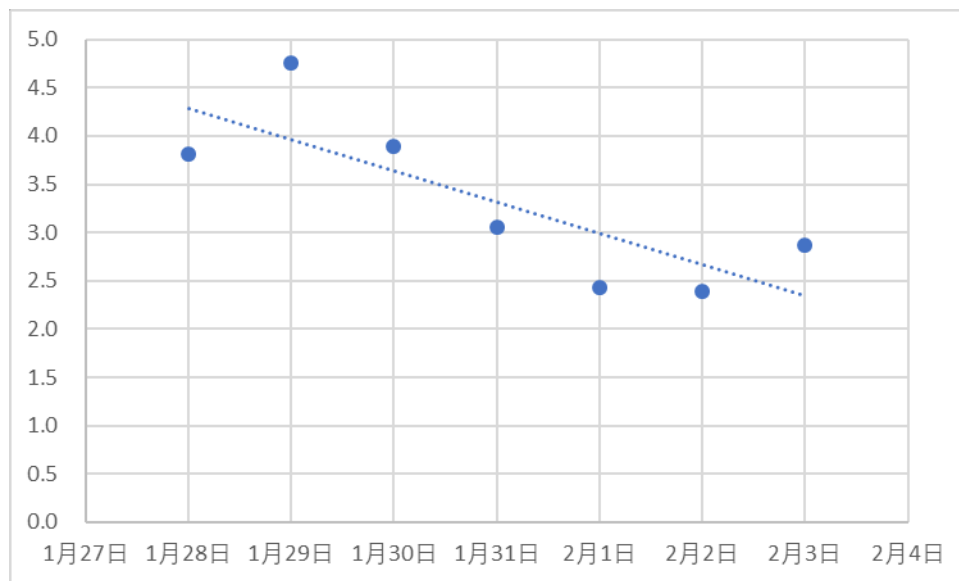
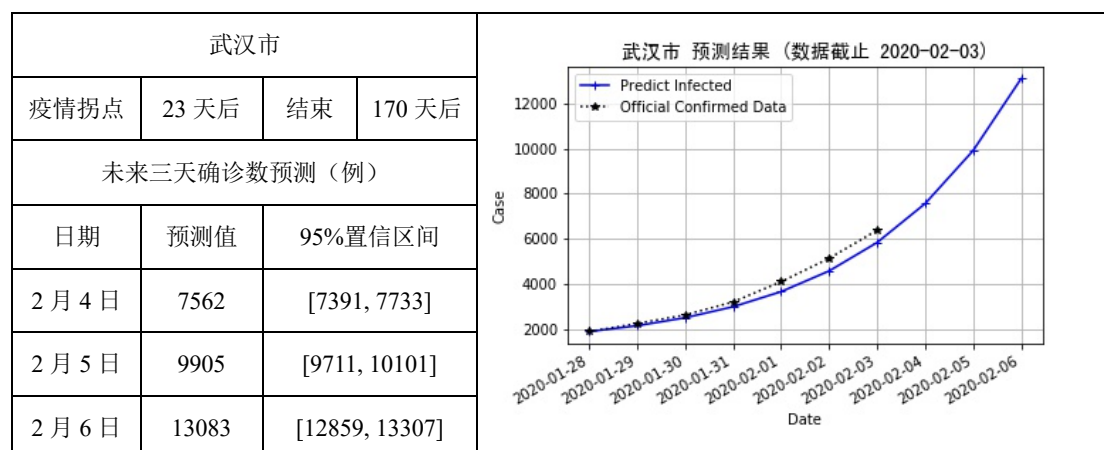


图 1 武汉市 R_0 趋势变化图

2.2 新增确诊数量预测分析



2.3 疫情缓解与趋势分析

主要结论：从近五日趋势上看，武汉市缓解指数持续为负值，这表明模型认为疫情还没有得到有效缓解。

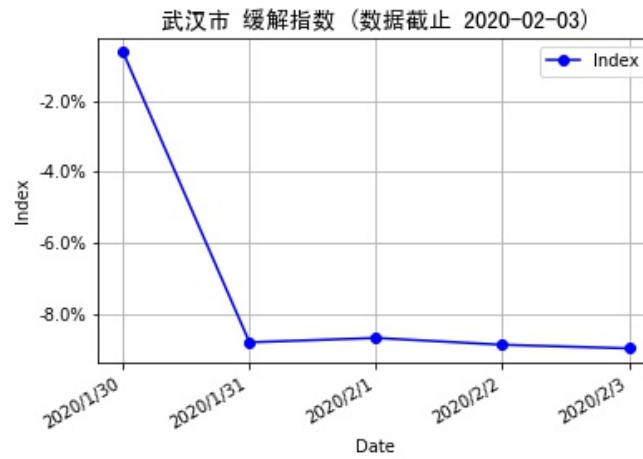


图 2 武汉市缓解指数变化图

3. 湖北省（不含武汉市）总体疫情评估预测

3.1 基本传染数 (R_0) 分析

主要结论：湖北省全省（除去武汉市）的确诊感染人数占了全国的 30% 以上，是目前控制疫情的主要区域，相较于武汉市，湖北省其他地区的平均 R_0 要低一点，但是也比较高，有缓慢的下降趋势（斜率为-0.02）。

基本传染数 R_0 概况与趋势：过去 7 天的基于湖北省数据的 R_0 数值变化如下图所示，均值为 3.0，斜率为-0.02。

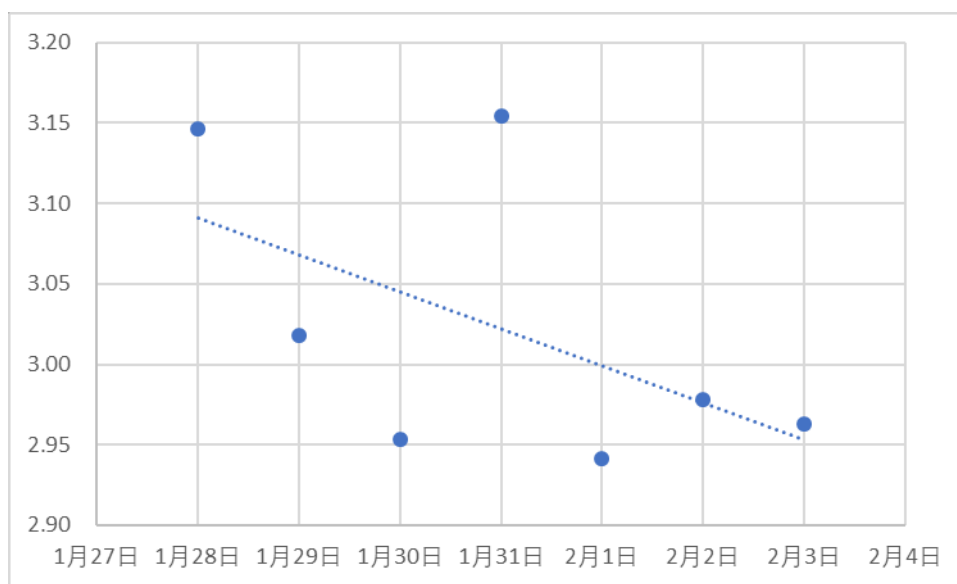
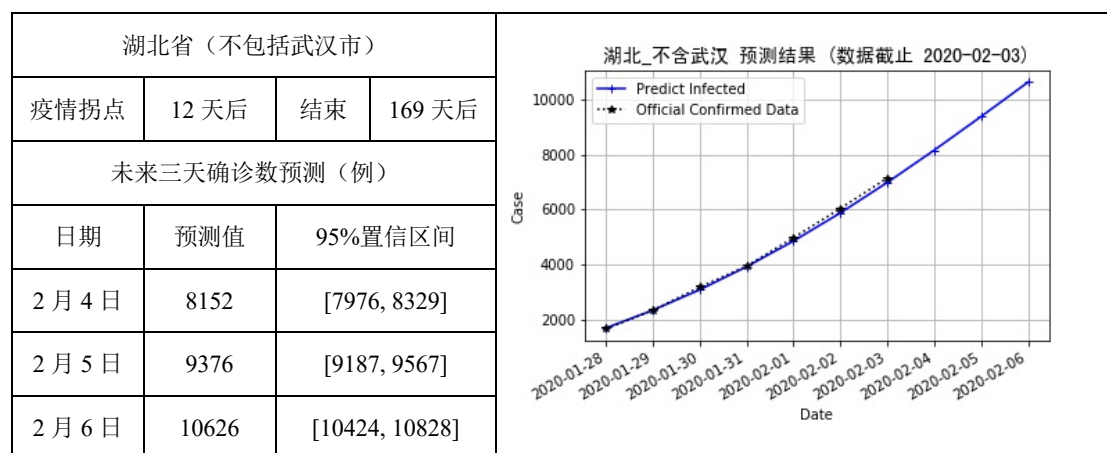


图 3 湖北省（不包含武汉市） R_0 趋势变化图

3.2 新增确诊数量预测分析



3.3 疫情缓解与趋势分析

主要结论：从近五日趋势上看，湖北省除武汉市外的其他地区缓解指数持续为负值，这表明模型认为疫情还没有得到有效缓解。

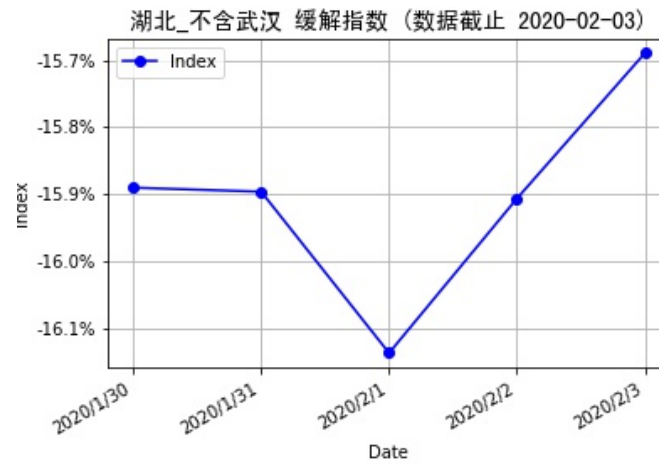


图 4 湖北省（不包含武汉市）缓解指数变化图

4. 全国（不含湖北省）总体疫情评估预测

4.1 基本传染数 (R_0) 分析

主要结论：除湖北省外，全国其他地区的 R_0 值近几日也比较高，说明在大部分城市中病毒也在快速传播， R_0 整体处于数值较高但有缓慢下降的趋势（斜率为-0.02）。

基本传染数 R_0 概况：过去 7 日内的全国与国内主要城市的 R_0 估算如下表所示。

表 1 过去 7 日全国与国内主要城市 R_0 变化表

城市名	1月28日	1月29日	1月30日	1月31日	2月1日	2月2日	2月3日	7日均值
武汉市	3.8	4.8	3.9	3.0	2.4	2.4	2.9	3.3
湖北省_不含武汉市	3.1	3.0	3.0	3.2	2.9	3.0	3.0	3.0
全国_不含湖北省	3.0	2.9	2.9	3.1	3.1	3.0	2.7	3.0
北京市	3.5	2.7	2.7	3.6	2.2	2.9	3.0	2.9
郑州市	/	3.6	2.8	2.2	2.2	2.7	2.6	3.2
兰州市	3.8	/	3.4	2.0	2.4	2.7	3.6	3.0
南昌市	3.1	2.3	3.0	3.8	4.8	3.0	2.6	3.2
合肥市	2.7	2.9	3.2	3.6	/	2.3	2.7	2.9
石家庄市	3.9	3.7	/	2.3	2.0	1.8	2.1	2.6
天津市	2.3	4.7	3.2	3.5	2.4	2.5	2.0	3.0
上海市	3.0	2.7	2.6	3.1	3.1	3.3	3.0	3.0
成都市	3.3	2.6	2.7	3.7	3.4	2.8	2.0	2.9
广州市	3.9	3.2	2.6	2.7	2.6	4.3	3.2	3.2
南京市	2.8	2.7	3.0	4.0	2.7	3.1	3.0	3.1
福州市	3.3	/	2.5	/	1.9	/	2.4	2.5
乌鲁木齐市	2.8	2.4	3.1	/	/	1.8	2.2	2.5
重庆市	3.9	3.0	2.3	2.7	2.9	2.9	3.0	2.9
长沙市	1.9	3.4	3.6	2.8	2.8	3.6	2.6	2.9
深圳市	1.9	2.8	3.6	2.3	4.3	3.8	2.8	3.1
济南市	2.7	3.2	3.2	3.2	3.0	2.6	2.3	2.9
温州市	2.2	2.9	3.6	5.8	3.6	2.8	2.1	3.3

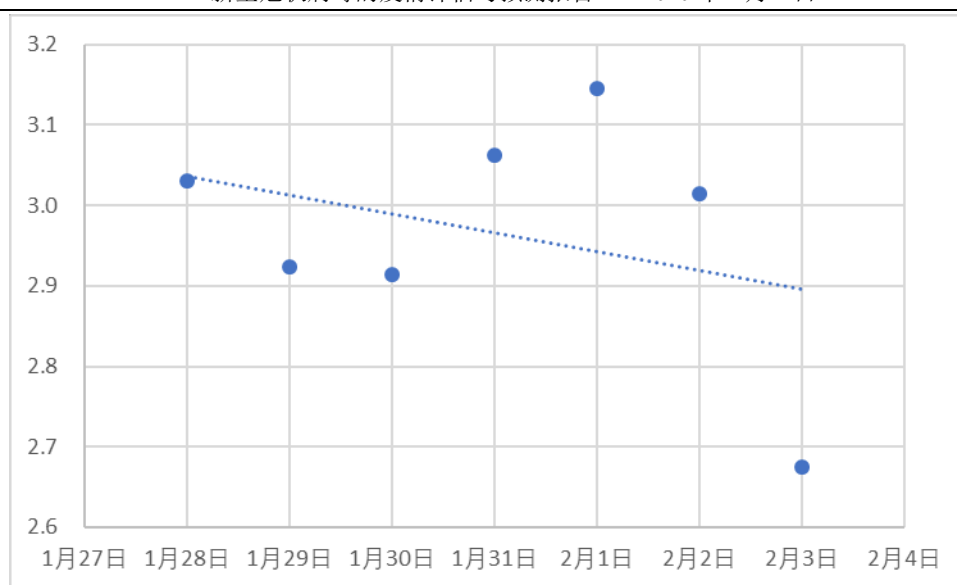
注：表中的“/”值表示算法中数据不足以在计算中得到 R_0 。

2020 年 2 月 3 日内地各省份新增病例与主要城市基本传染系数 (R_0) 情况如下图所示：



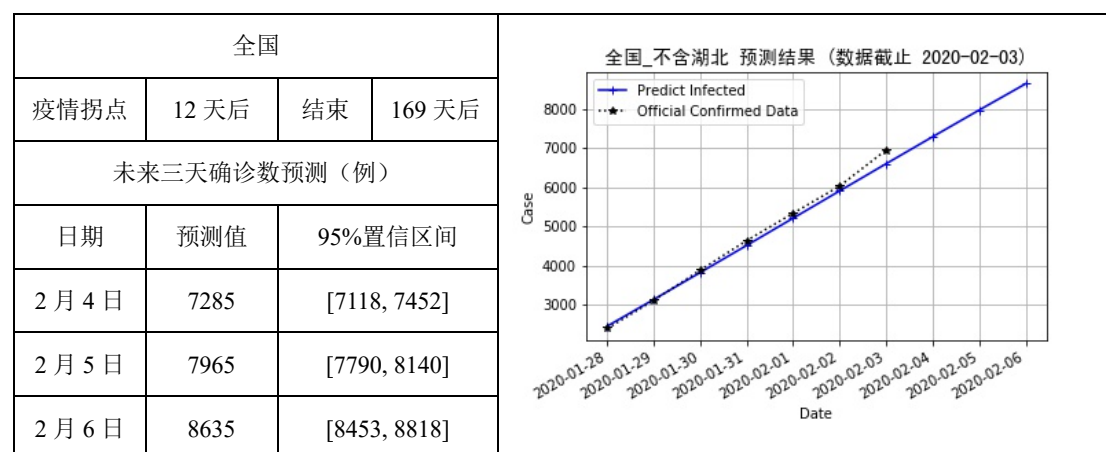
图 5 2020 年 2 月 3 日内地各省份新增病例情况与主要城市 R_0 ，省份颜色表示新增病例情况，城市圆圈大小表示 R_0 情况。该截图可通过此链接访问 <http://www.ncov-report.com/>

基本传染数 R_0 趋势：过去 7 天的基于全国的数据的 R_0 数值变化如下图所示，均值为 3.0，斜率为-0.02。


 图 6 全国（不包含湖北省） R_0 值变化趋势图

4.2 新增确诊数量预测分析

基于过去 7 日的确诊情况历史数据，得到对未来三日全国（不包含湖北省）的总体确诊数据如下表所示。



考虑到不断加强的防疫措施，真实确诊数据预计会低于预测数据的最低置信区间。

模型对 2020 年 2 月 3 日全国各城市的新增确诊数预测情况如下：

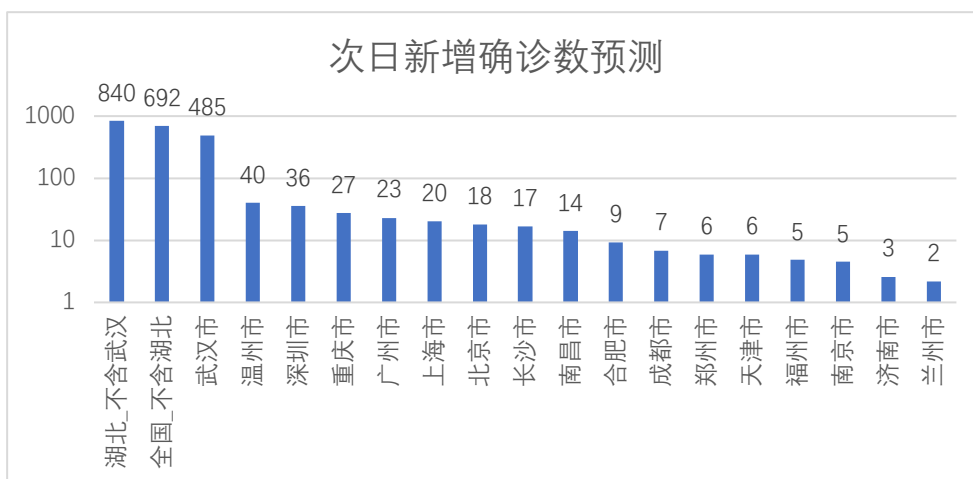


图 7 各城市次日新增确诊数预测分布（对数坐标系）

4.3 疫情缓解与趋势分析

疫情拐点时间预测：模型预计疫情将在 12 天后新增确诊病例将出现下降，疫情出现拐点。

疫情结束时间预测：模型预计疫情将在 169 天后将不再有新增确诊病例，疫情基本结束。

疫情缓解指数：模型估计 2020 年 2 月 3 日的疫情的缓解指数为 37.55%，表明模型估计疫情在全国范围内有一定缓解。

以 1 月 28 日数据为基准，过去 5 天全国疫情缓解指数变化情况如下图：

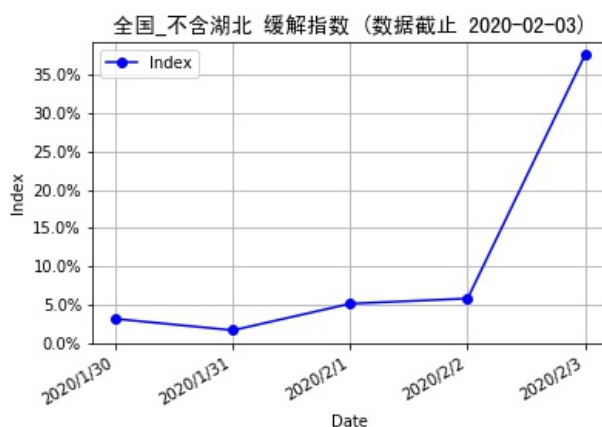


图 8 全国缓解指数变化图

表 2 近 5 日全国与国内主要城市缓解指数变化表

城市名	1月30日	1月31日	2月1日	2月2日	2月3日
武汉市	-0.63%	-8.80%	-8.68%	-8.87%	-8.97%
湖北 不含武汉	-15.89%	-15.90%	-16.14%	-15.91%	-15.69%
全国 不含湖北	3.15%	1.66%	5.13%	5.80%	37.55%
北京市	1.96%	5.25%	12.16%	11.48%	27.97%
郑州市	0.74%	1.19%	2.53%	19.81%	12.70%
兰州市	0.00%	0.42%	1.55%	4.68%	22.06%
南昌市	0.00%	0.00%	0.22%	0.73%	1.66%
合肥市	0.29%	0.67%	2.55%	4.71%	5.65%
石家庄市	1.21%	4.18%	8.26%	16.11%	14.21%
天津市	2.54%	2.84%	5.22%	9.05%	17.50%
上海市	4.60%	5.35%	9.77%	10.44%	14.19%
成都市	-0.37%	0.24%	8.02%	14.50%	20.00%
广州市	0.64%	1.47%	2.73%	2.52%	7.84%
南京市	0.53%	0.81%	1.70%	2.08%	4.96%
福州市	-15.75%	-15.52%	-14.94%	-14.55%	-10.36%
乌鲁木齐市	-1.26%	8.48%	24.75%	23.41%	16.71%
重庆市	0.60%	3.23%	11.47%	16.87%	27.29%
长沙市	1.31%	2.92%	1.97%	5.27%	5.54%
深圳市	15.79%	-0.30%	3.09%	-1.18%	-1.01%
济南市	0.78%	1.42%	2.20%	3.73%	19.99%
温州市	0.52%	0.60%	0.85%	1.52%	2.68%

5. 全国主要城市基本传染系数与传染估算

北京市

过去 7 天的基于北京市数据的基本传染系数的数值变化趋势图如下图所示。均值为 2.9，斜率为-0.05。

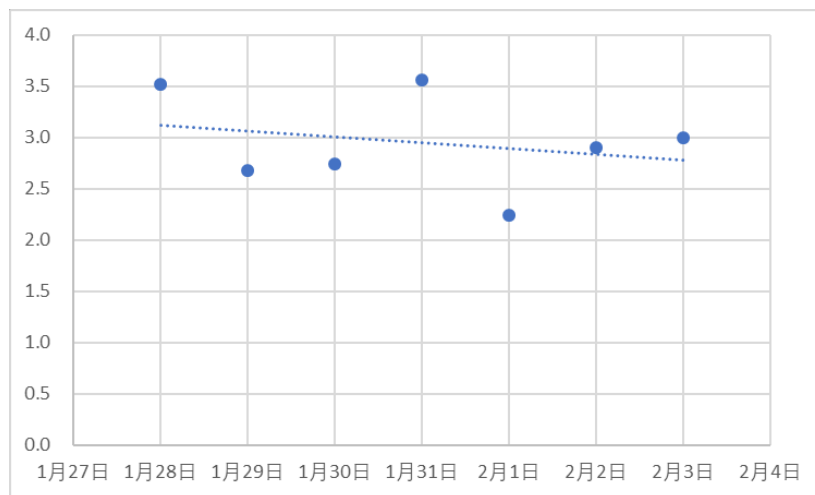


图 9 北京市 R_0 变化趋势图

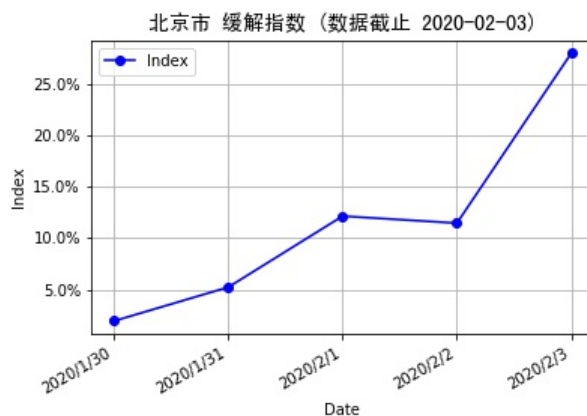
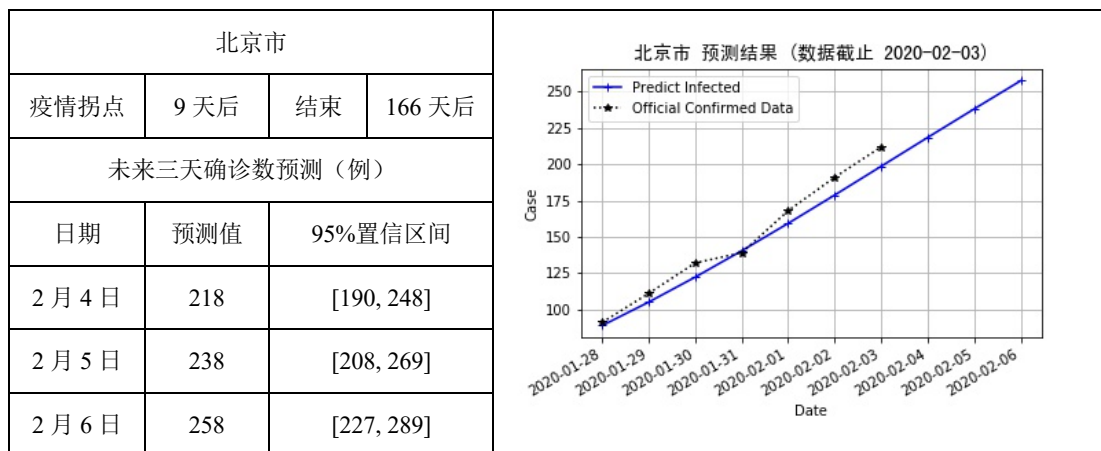


图 10 北京市缓解指数变化趋势图

郑州市

过去 7 天的基于郑州市数据的基本传染系数的数值变化趋势图如下图所示。均值为 2.7，斜率为-0.14。

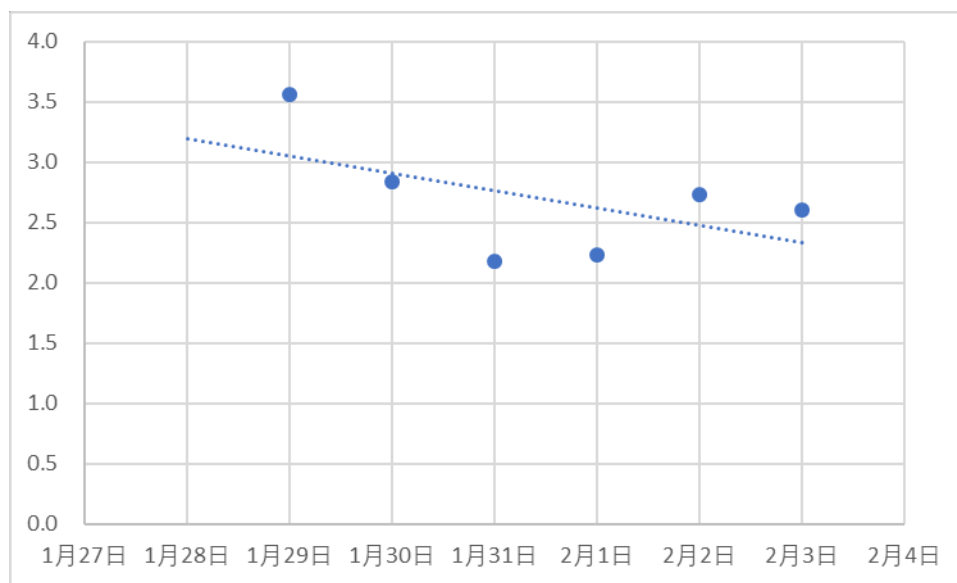


图 11 郑州市 R_0 趋势图

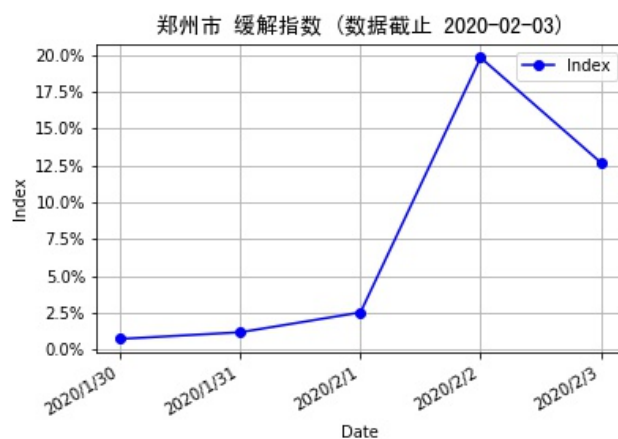
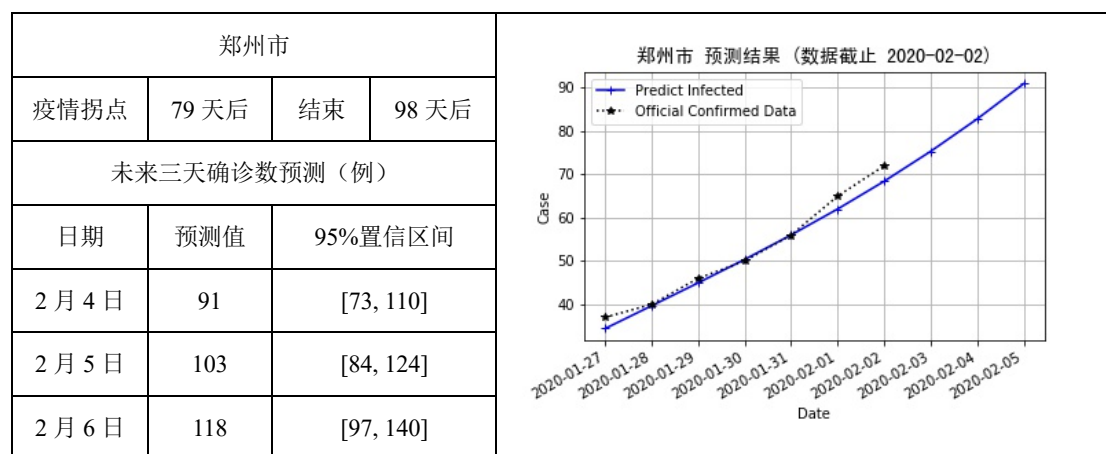


图 12 郑州市缓解指数变化趋势图

兰州市

过去 7 天的基于兰州市数据的基本传染系数的数值变化趋势图如下图所示。均值为 3.0，斜率为-0.09。

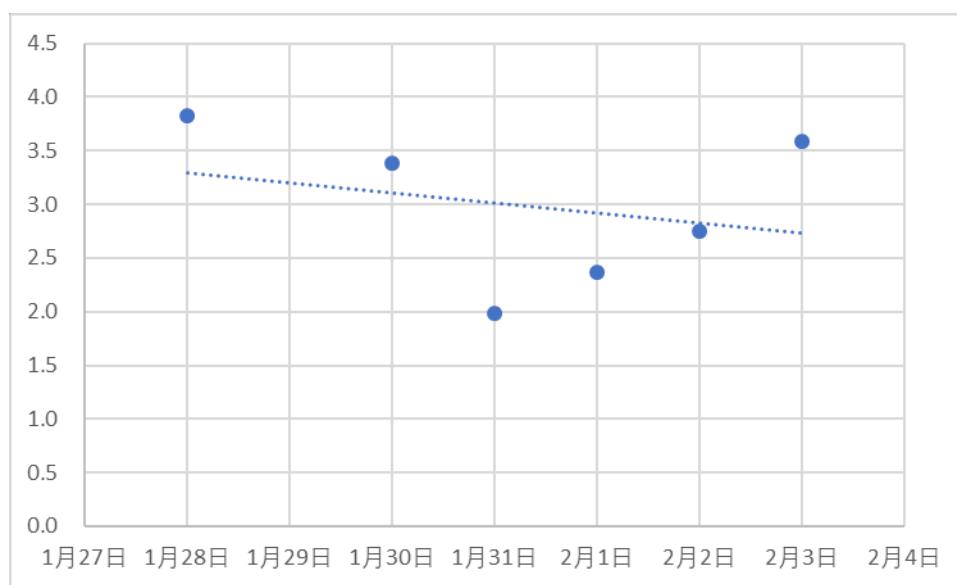


图 13 兰州市 R_0 趋势图

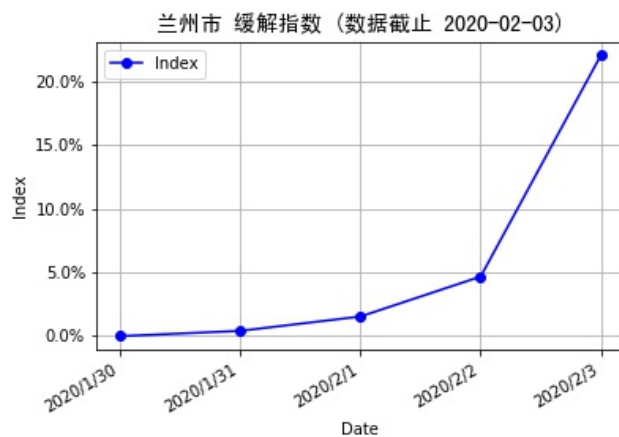
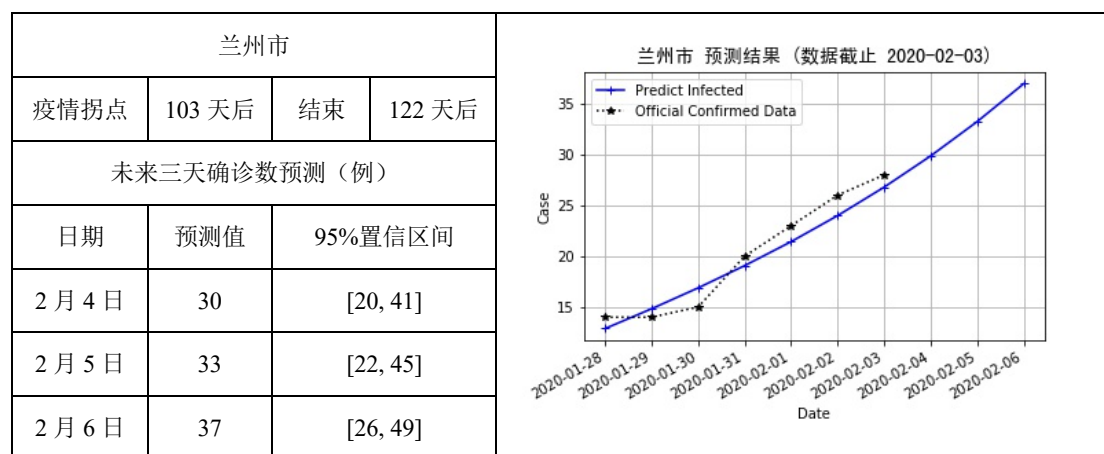


图 14 兰州市缓解指数变化趋势图

南昌市

过去 7 天的基于南昌市数据的基本传染系数的数值变化趋势图如下图所示。均值为 3.2，斜率为 0.06。

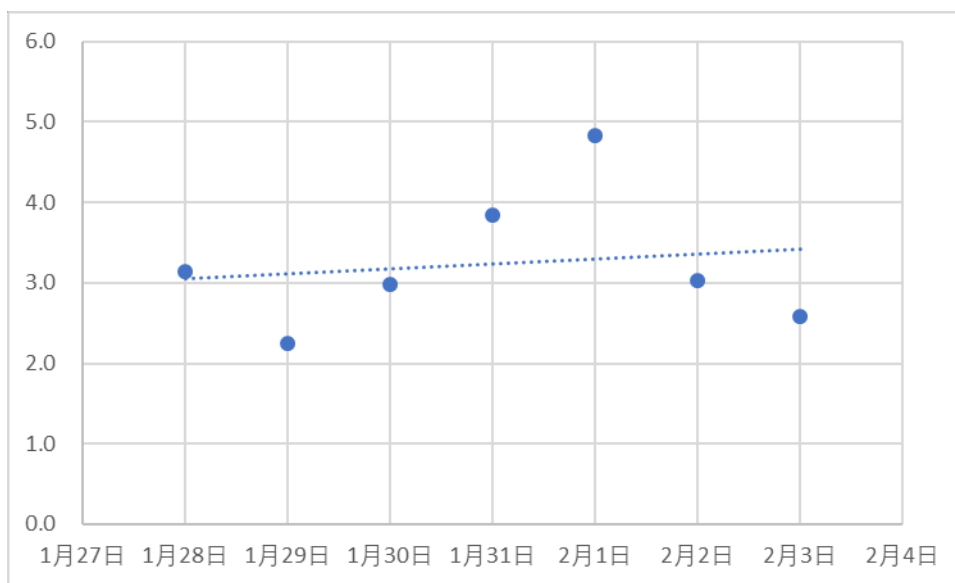


图 15 南昌市 R_0 趋势图

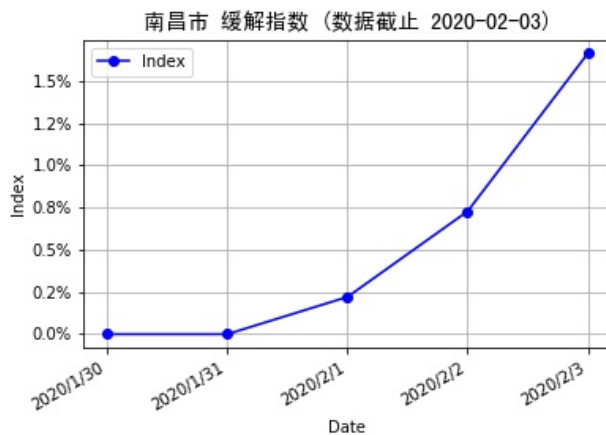
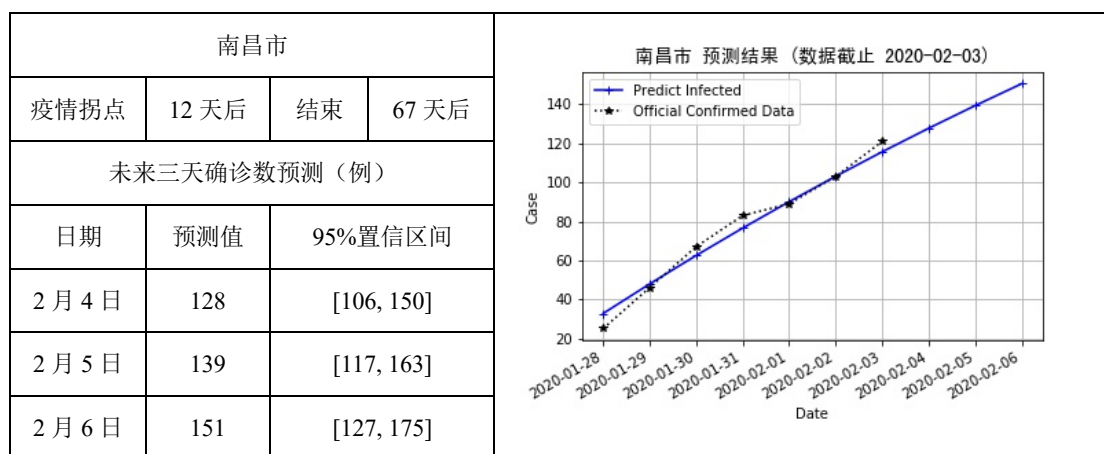


图 16 南昌市缓解指数变化趋势图

合肥市

过去 7 天的基于合肥市数据的基本传染系数的数值变化趋势图如下图所示。均值为 2.9，斜率为-0.05。

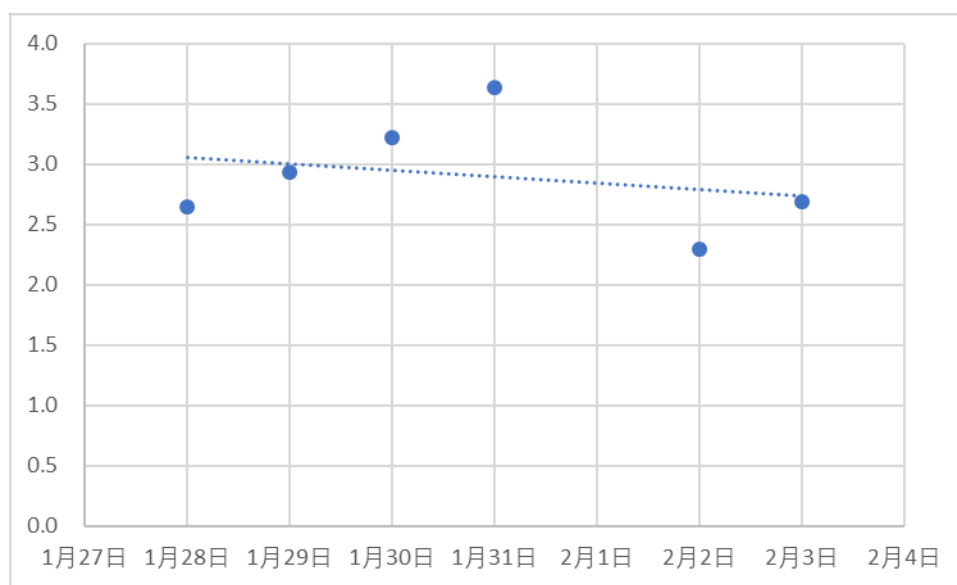


图 17 合肥市 R_0 趋势图

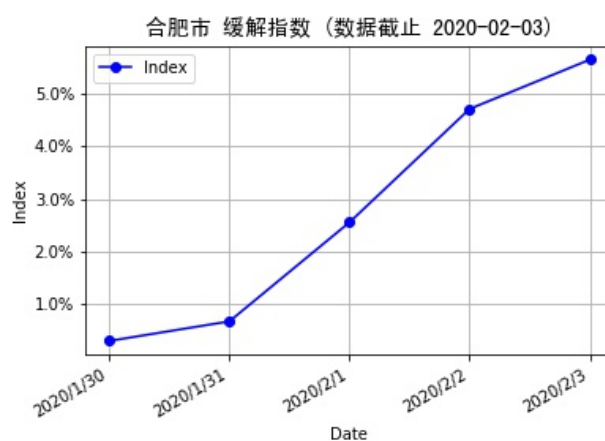
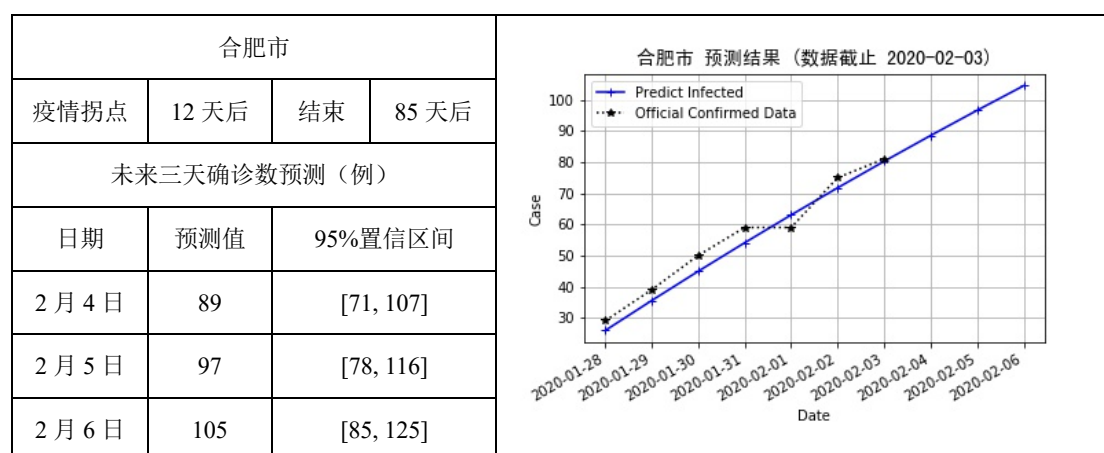


图 18 合肥市缓解指数变化趋势图

石家庄市

过去 7 天的基于石家庄市数据的基本传染系数的数值变化趋势图如下图所示。均值为 2.6，斜率为-0.35。

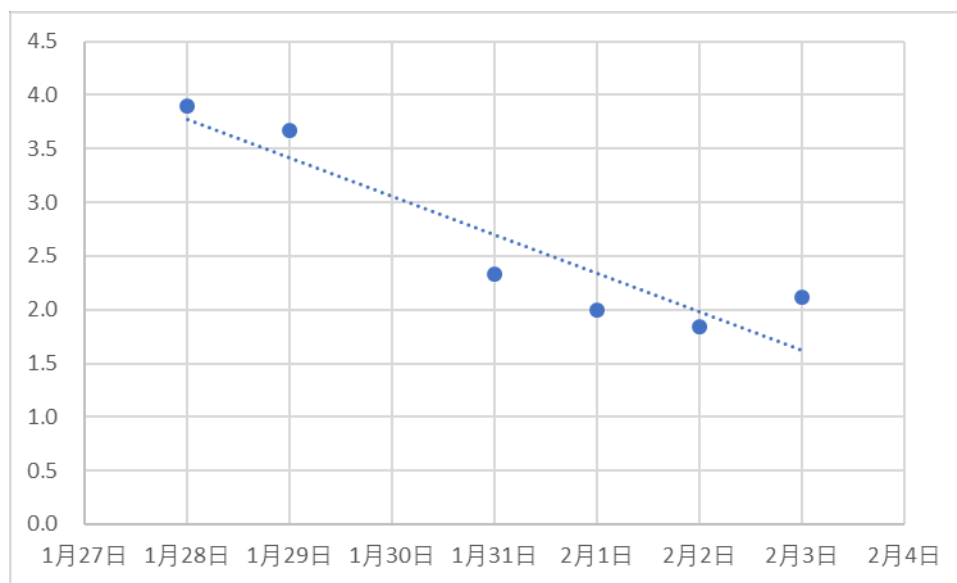


图 19 石家庄市 R_0 趋势图

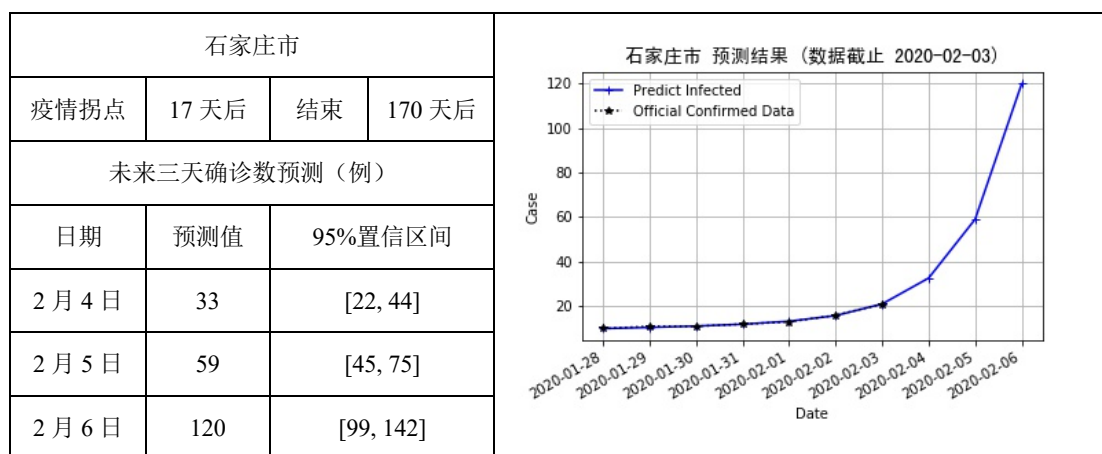


图 20 石家庄市缓解指数变化趋势图

天津市

过去 7 天的基于天津市数据的基本传染系数的数值变化趋势图如下图所示。均值为 3.0，斜率为-0.22。

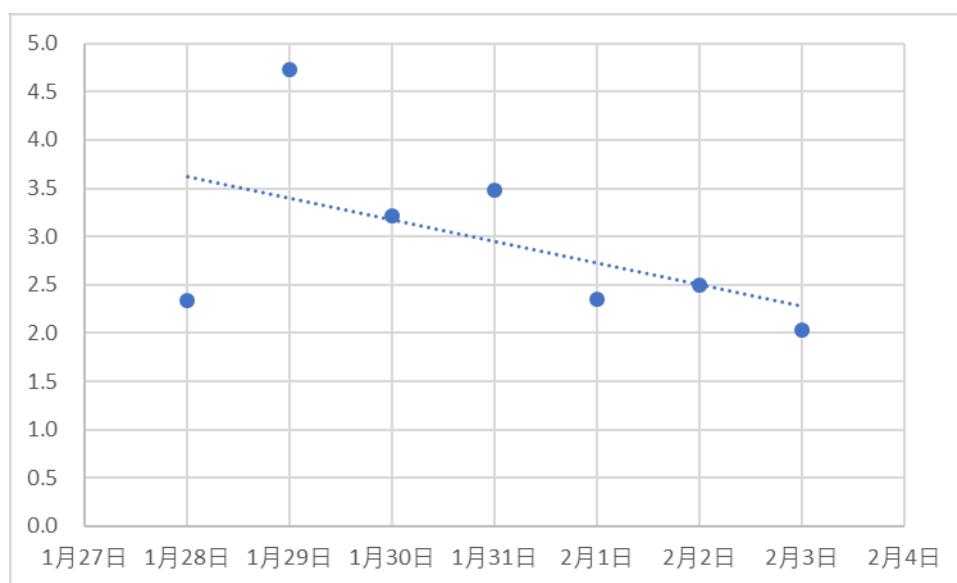


图 21 天津市 R_0 趋势图

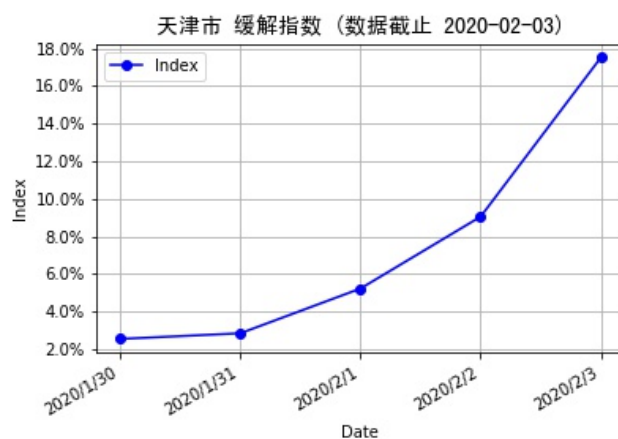
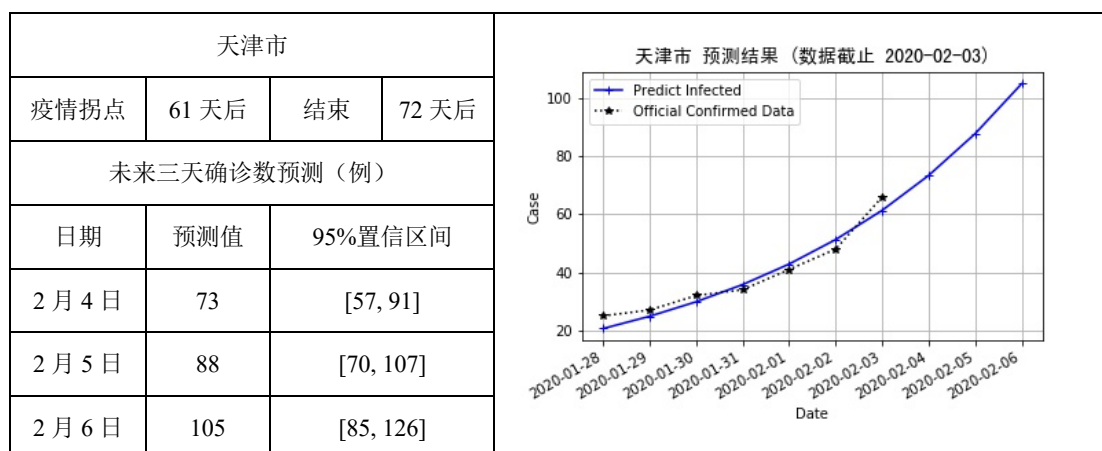


图 22 天津市缓解指数变化趋势图

上海市

过去 7 天的基于上海市数据的基本传染系数的数值变化趋势图如下图所示。均值为 3.0，斜率为 0.06。

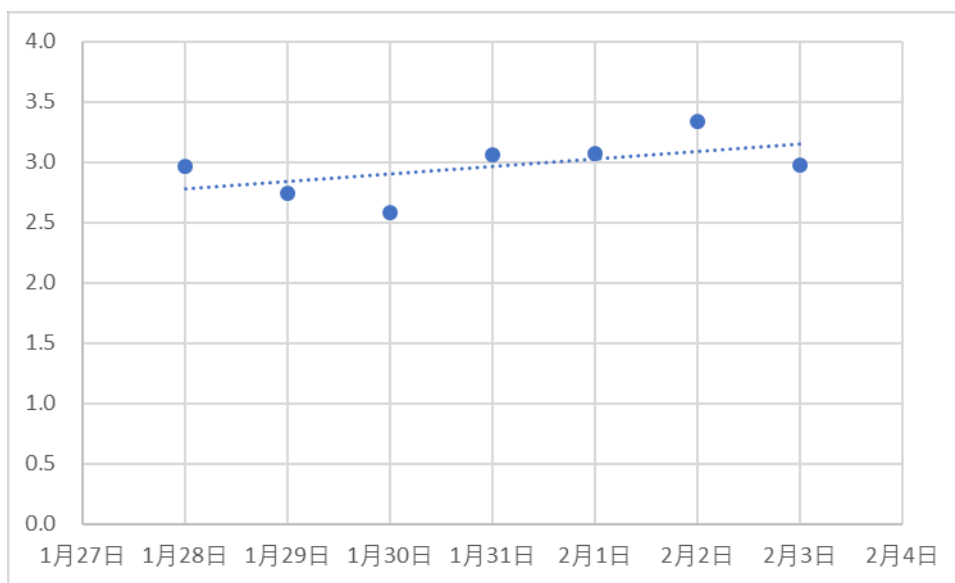


图 23 上海市 R_0 趋势图

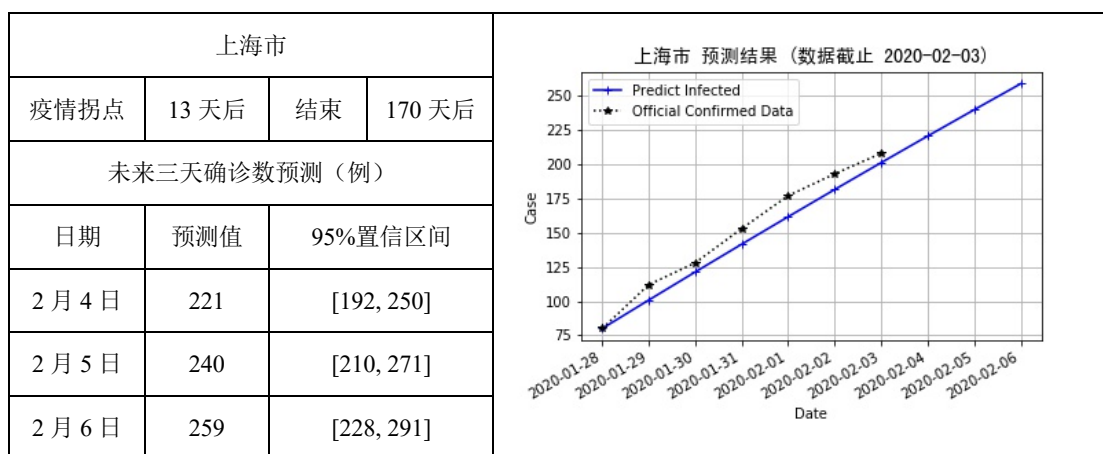


图 24 上海市缓解指数变化趋势图

成都市

过去 7 天的基于成都市数据的基本传染系数的数值变化趋势图如下图所示。均值为 2.9，斜率为-0.10。

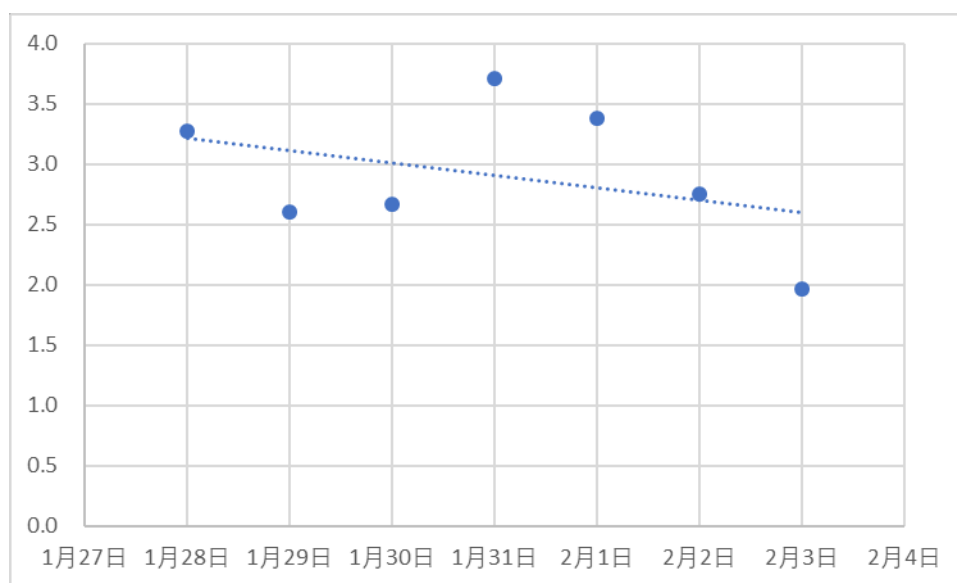


图 25 成都市 R_0 趋势图

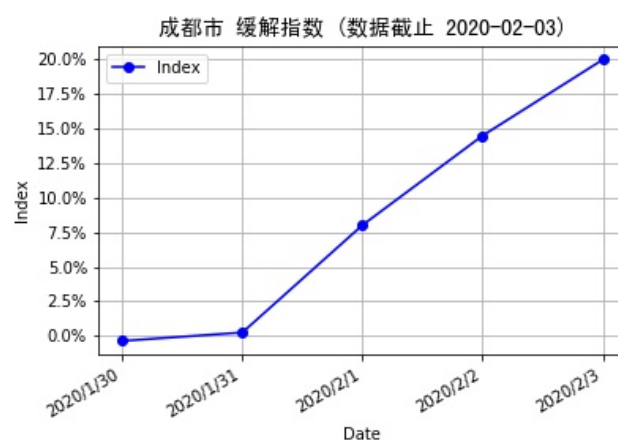
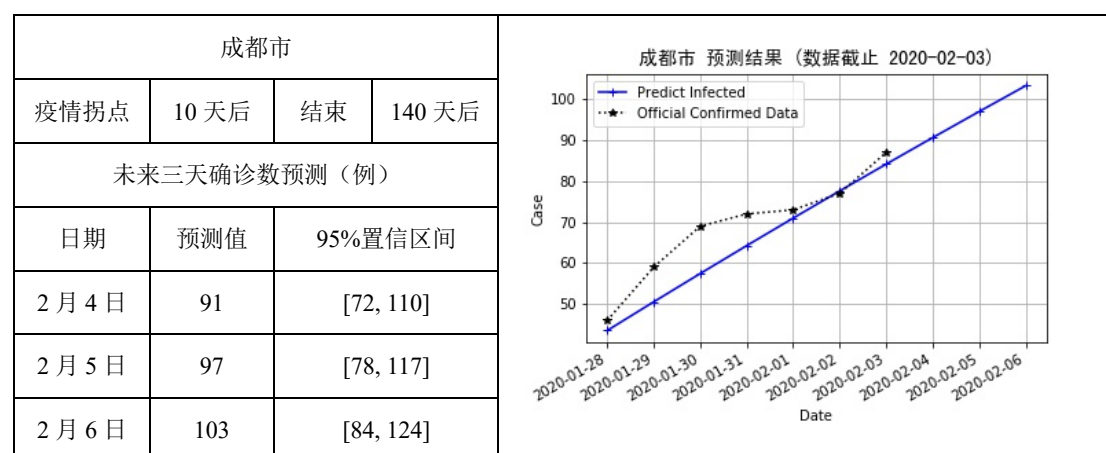


图 26 成都市缓解指数变化趋势图

广州市

过去 7 天的基于广州市数据的基本传染系数的数值变化趋势图如下图所示。均值为 3.2，斜率为 0。

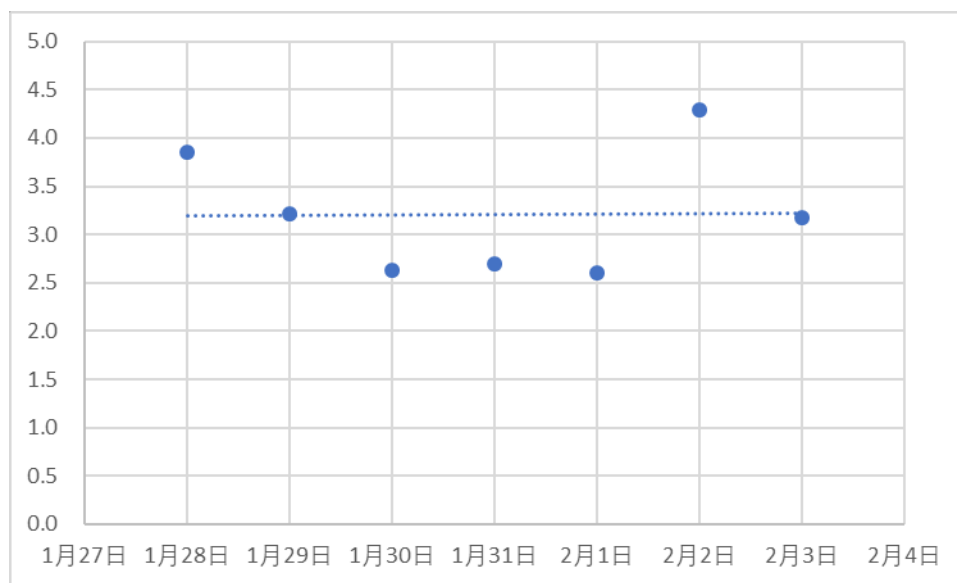


图 27 广州市 R_0 趋势图

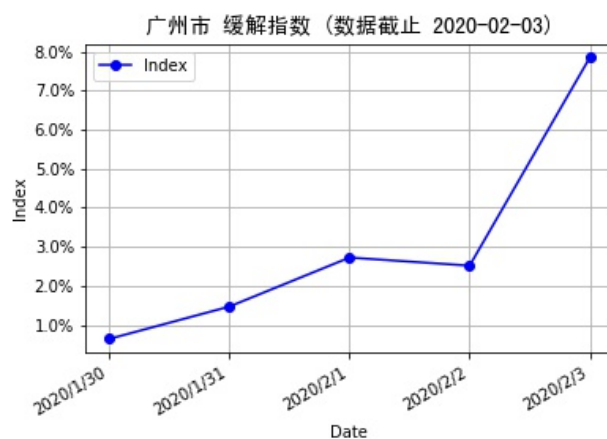
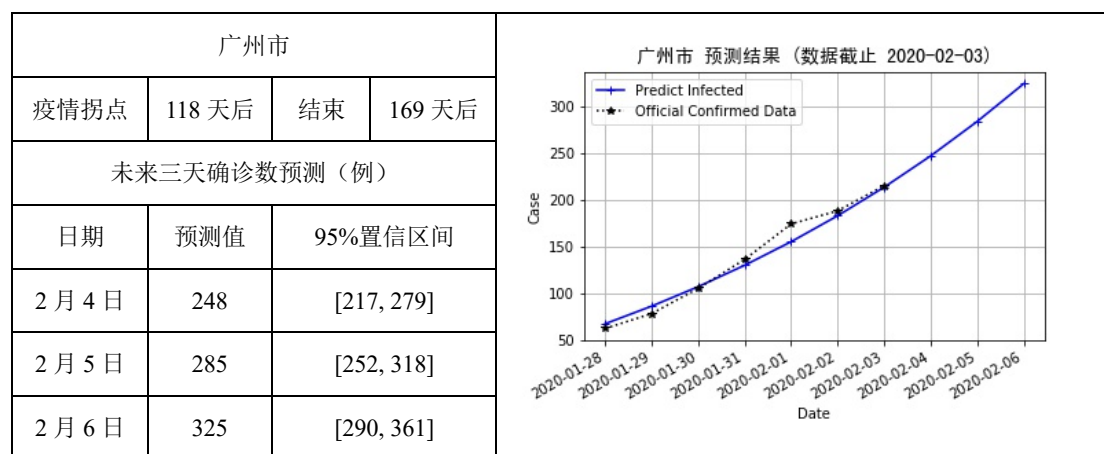


图 28 广州市缓解指数变化趋势图

南京市

过去 7 天的基于南京市数据的基本传染系数的数值变化趋势图如下图所示。均值为 3.1，斜率为 0.03。

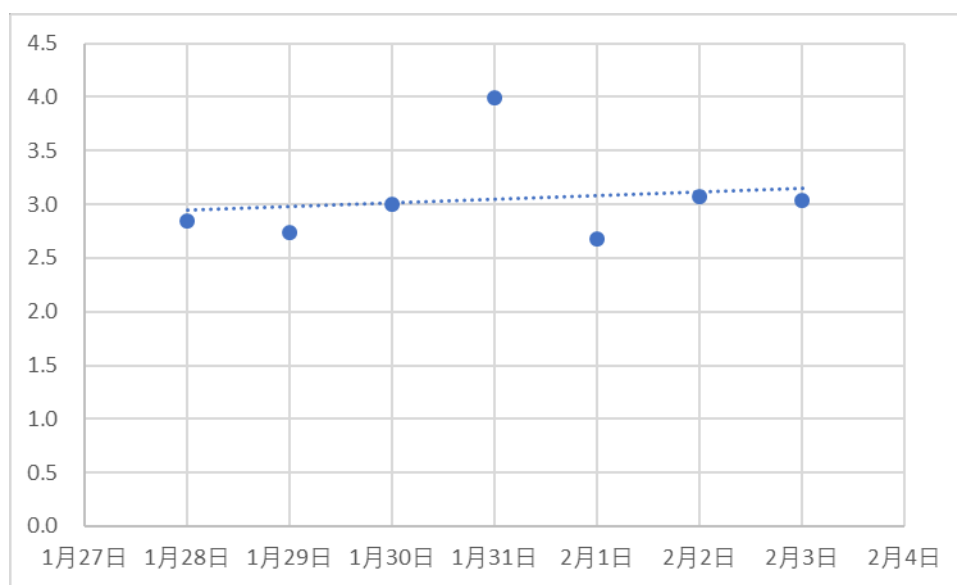


图 29 南京市 R_0 趋势图

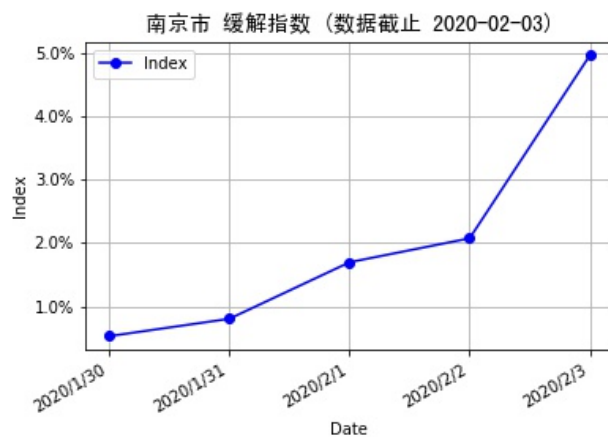
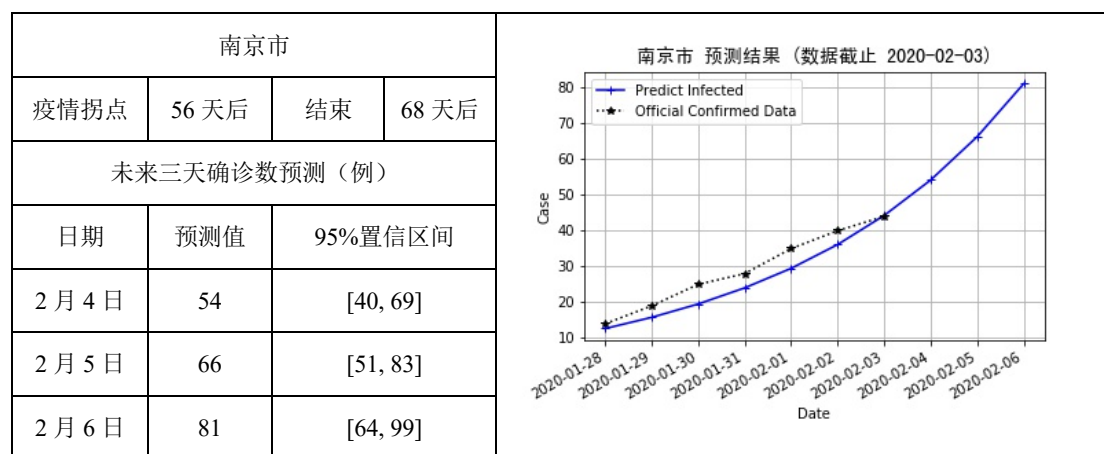


图 30 南京市缓解指数变化趋势图

福州市

过去 7 天的基于福州市数据的基本传染系数的数值变化趋势图如下图所示。均值为 2.5，斜率为-0.16。

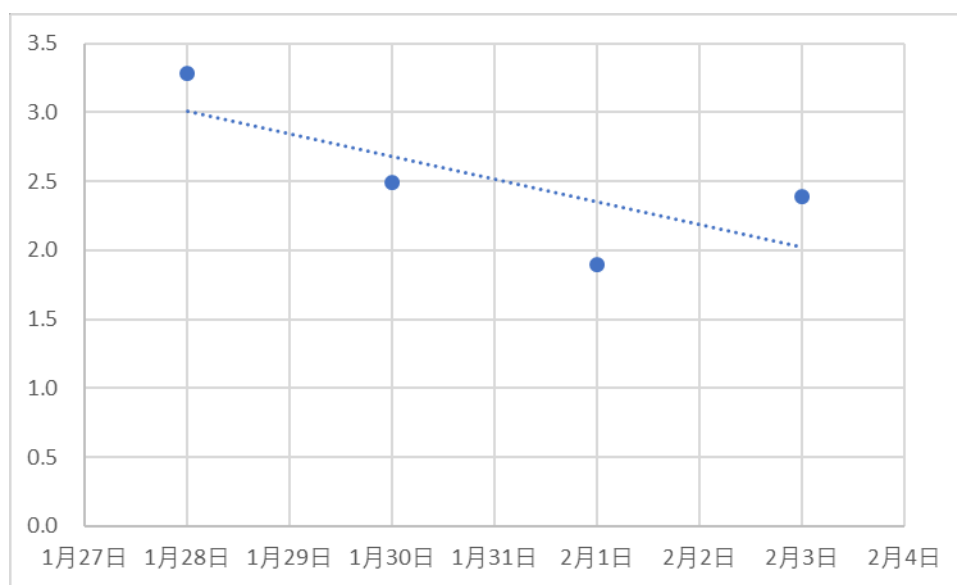


图 31 福州市 R_0 趋势图

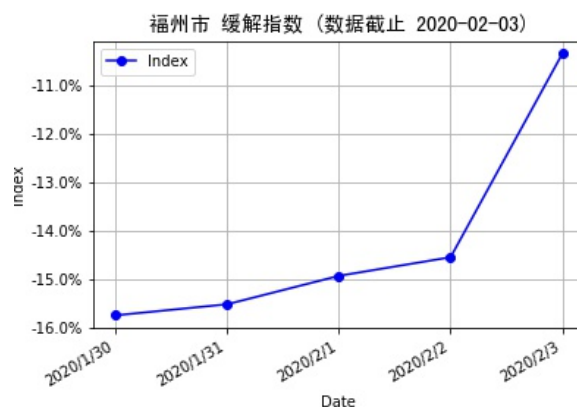
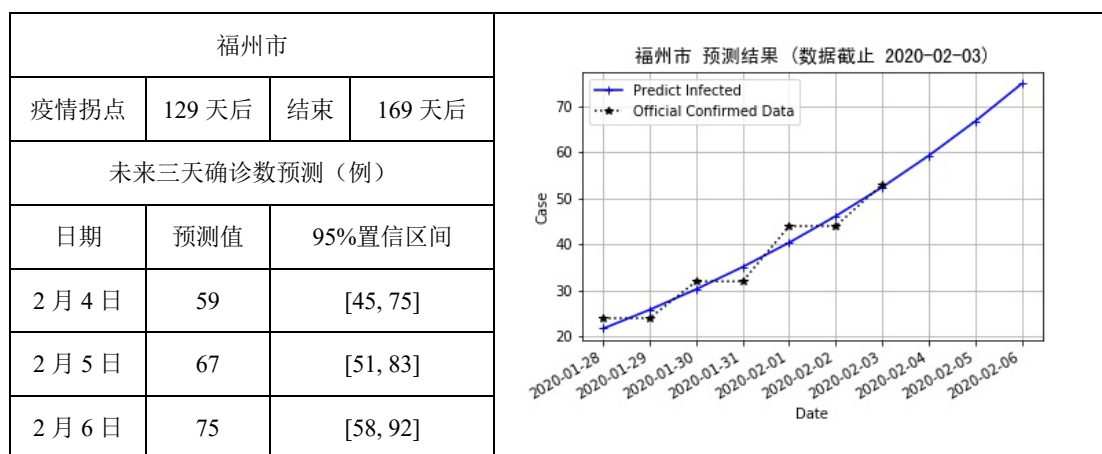


图 32 福州市缓解指数变化趋势图

乌鲁木齐市

过去 7 天的基于乌鲁木齐市数据的基本传染系数的数值变化趋势图如下图所示。均值为 2.5，斜率为-0.14。

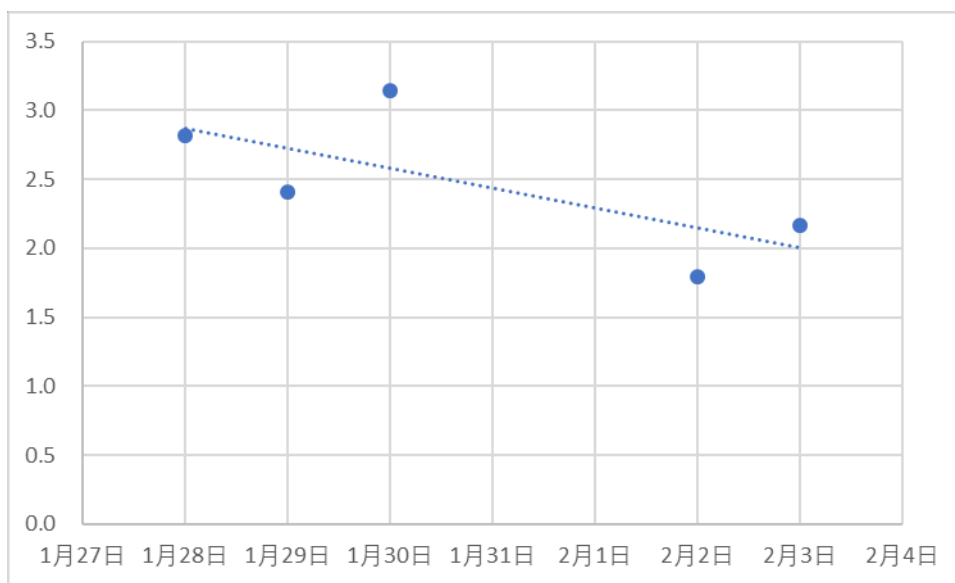


图 33 乌鲁木齐市 R_0 趋势图

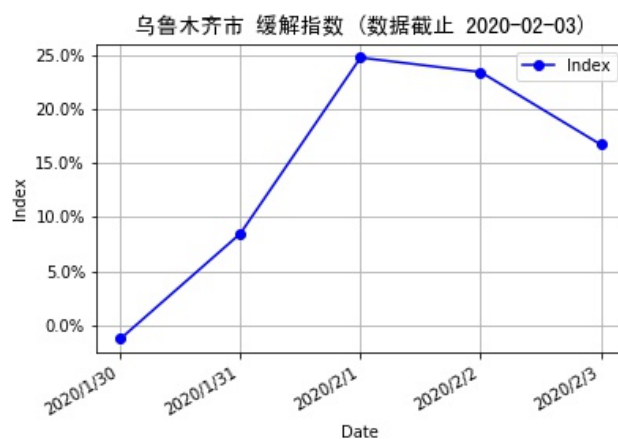
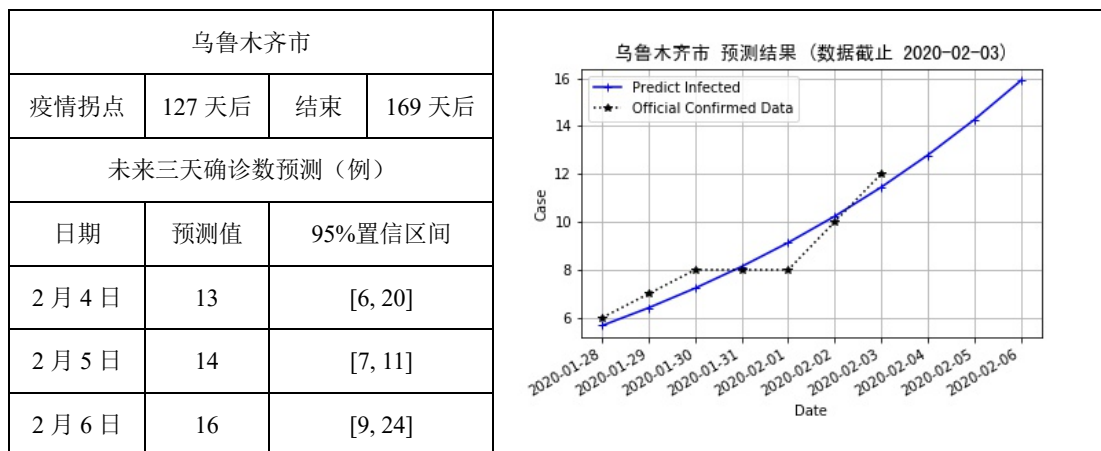


图 34 乌鲁木齐市缓解指数变化趋势图

重庆市

过去 7 天的基于重庆市数据的基本传染系数的数值变化趋势图如下图所示。均值为 2.9，斜率为-0.07。

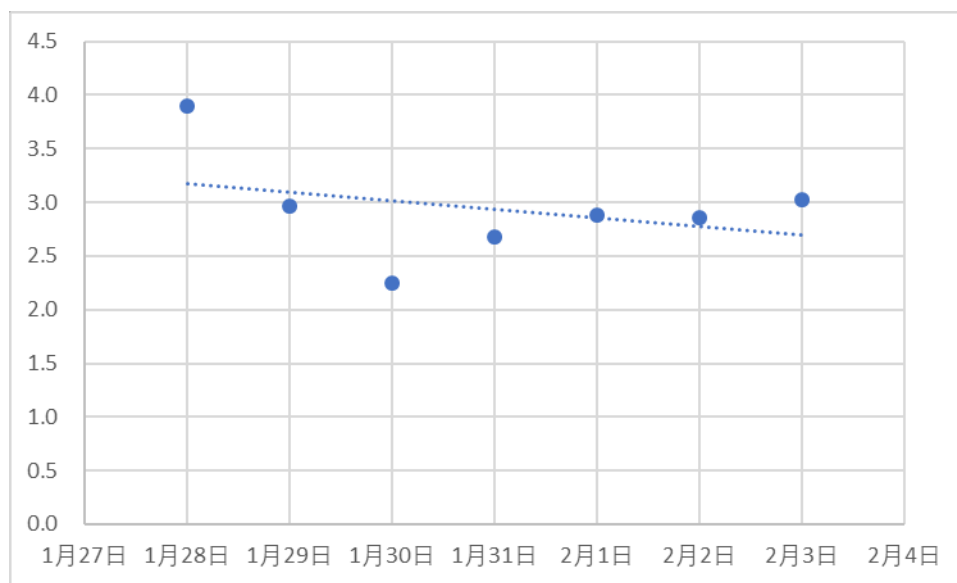


图 35 重庆市 R_0 趋势图

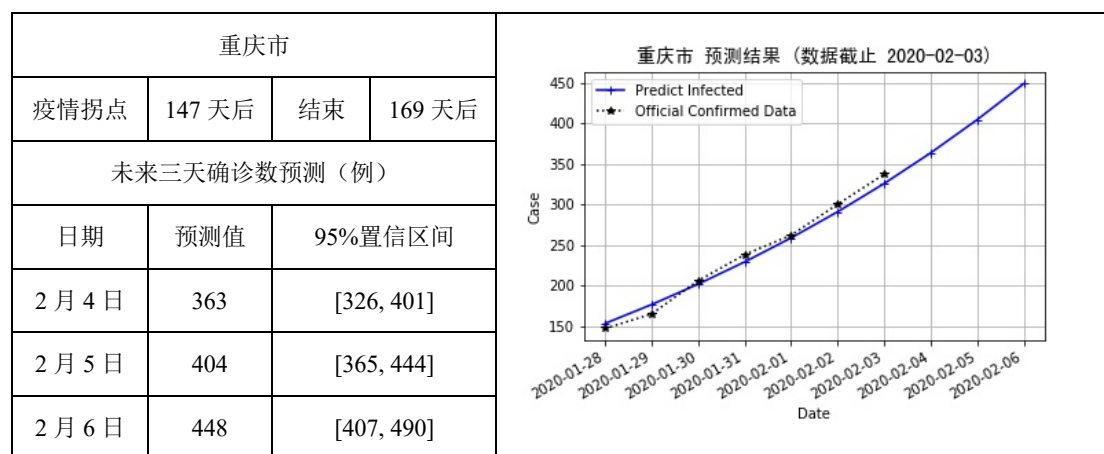


图 36 重庆市缓解指数变化趋势图

长沙市

过去 7 天的基于长沙市数据的基本传染系数的数值变化趋势图如下图所示。均值为 2.9，斜率为 0.06。

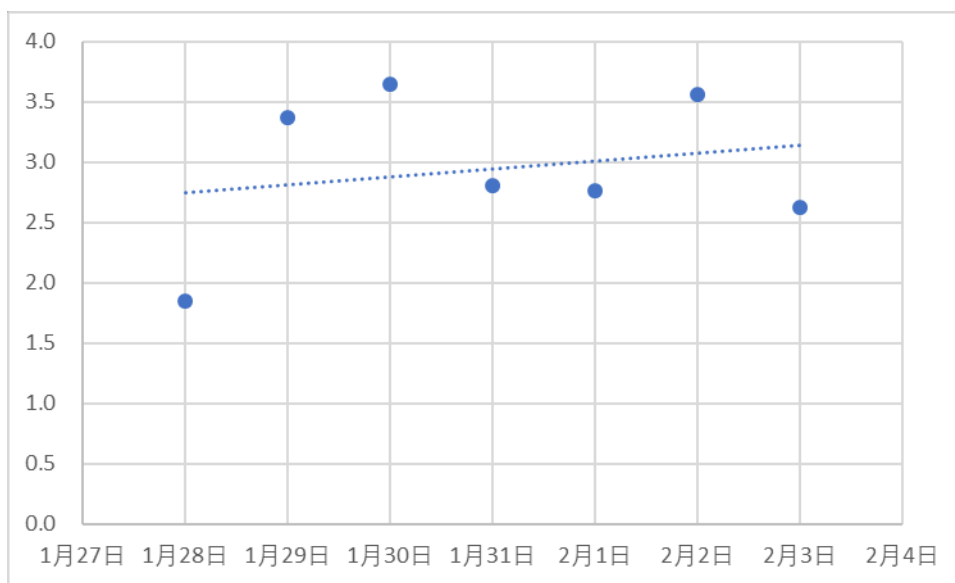


图 37 长沙市 R_0 趋势图

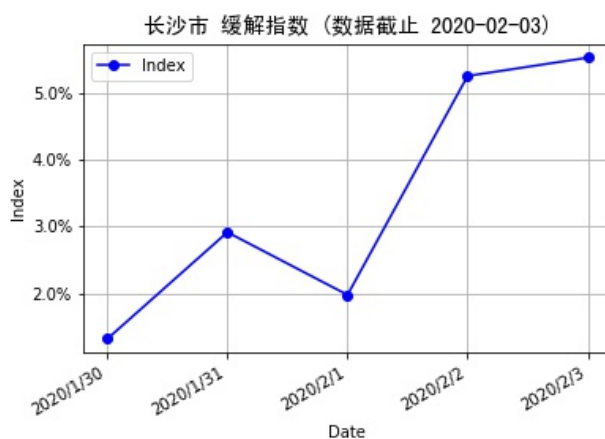
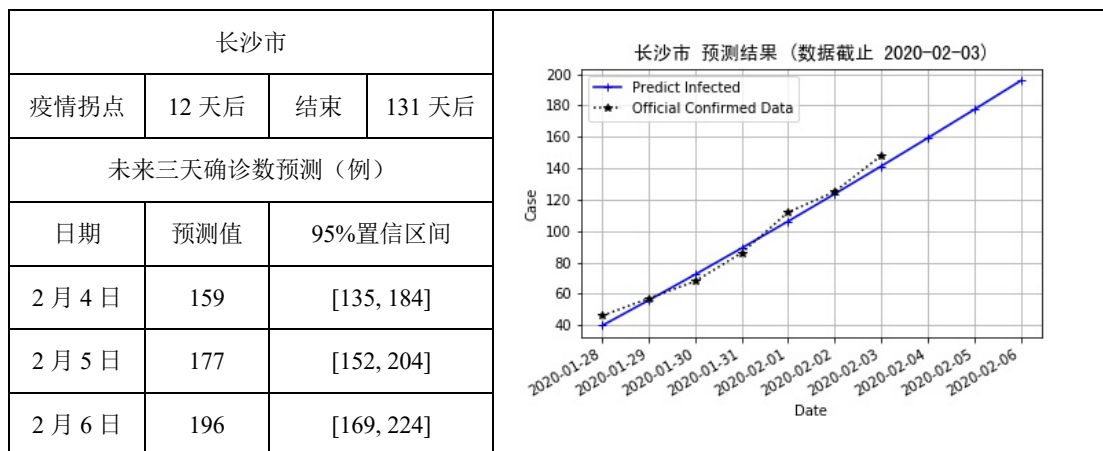


图 38 长沙市缓解指数变化趋势图

深圳市

过去 7 天的基于深圳市数据的基本传染系数的数值变化趋势图如下图所示。均值为 3.1，斜率为 0.20。

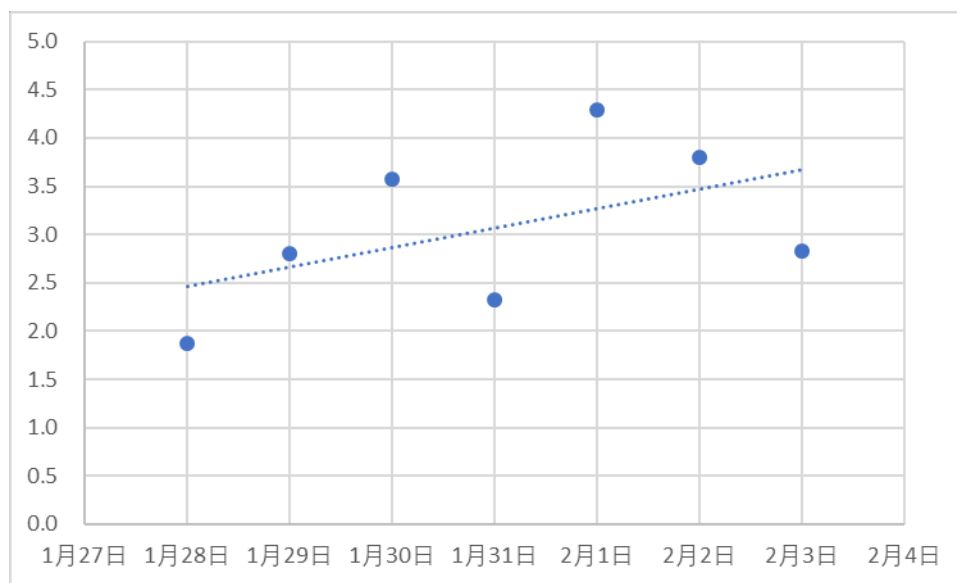


图 39 深圳市 R_0 趋势图

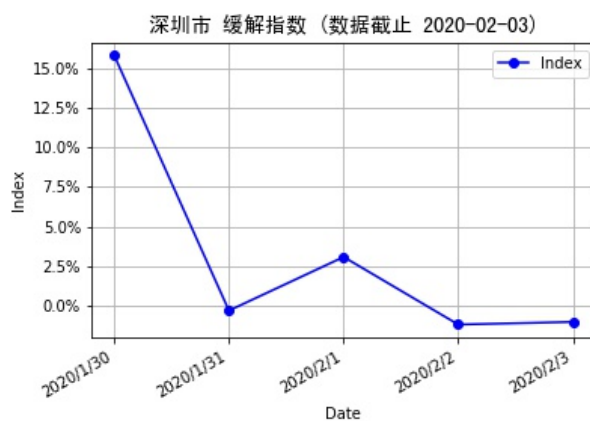
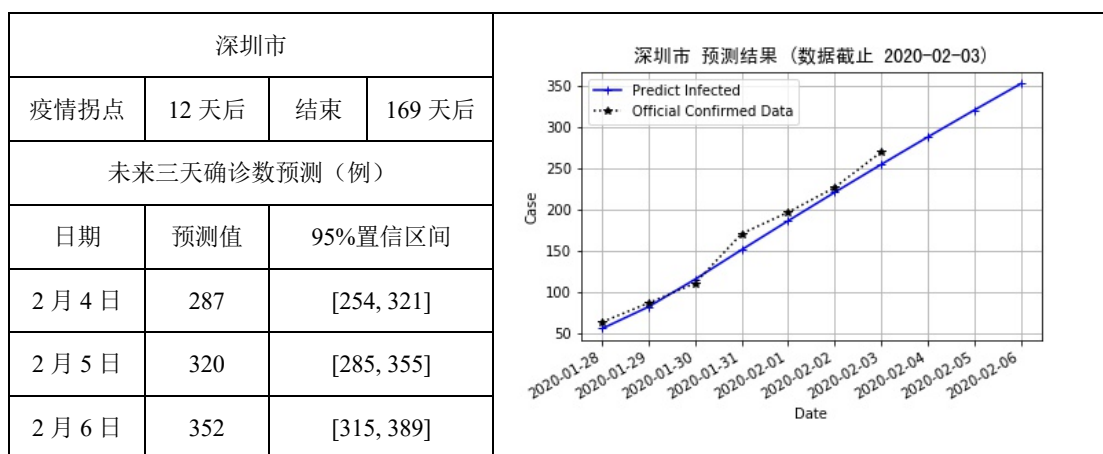


图 40 深圳市缓解指数变化趋势图

济南市

过去 7 天的基于济南市数据的基本传染系数的数值变化趋势图如下图所示。均值为 2.9，斜率为-0.09。

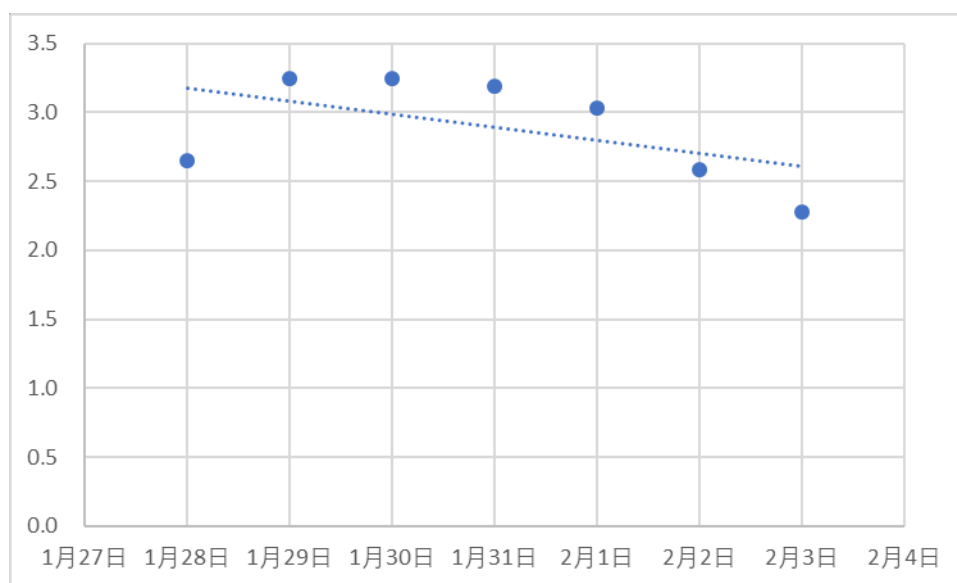


图 41 济南市 R_0 趋势图

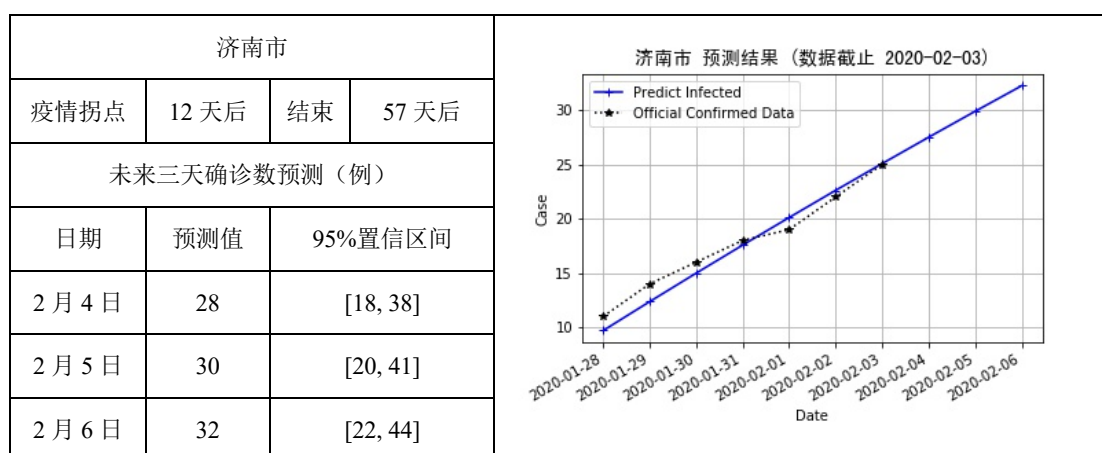


图 42 济南市缓解指数变化趋势图

温州市

过去 7 天的基于温州市数据的基本传染系数的数值变化趋势图如下图所示。均值为 3.3，斜率为-0.01。

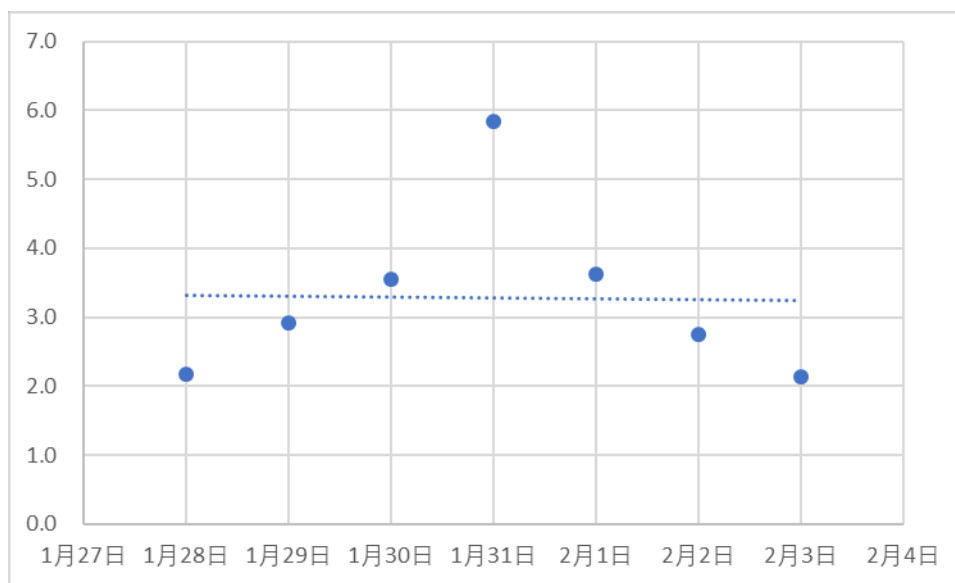


图 43 温州市 R_0 趋势图

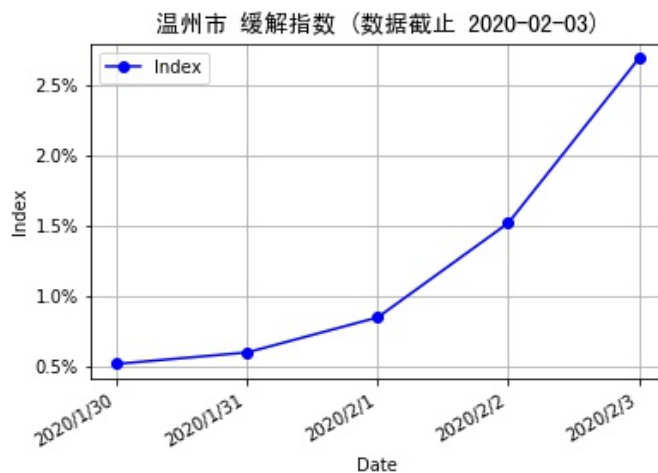
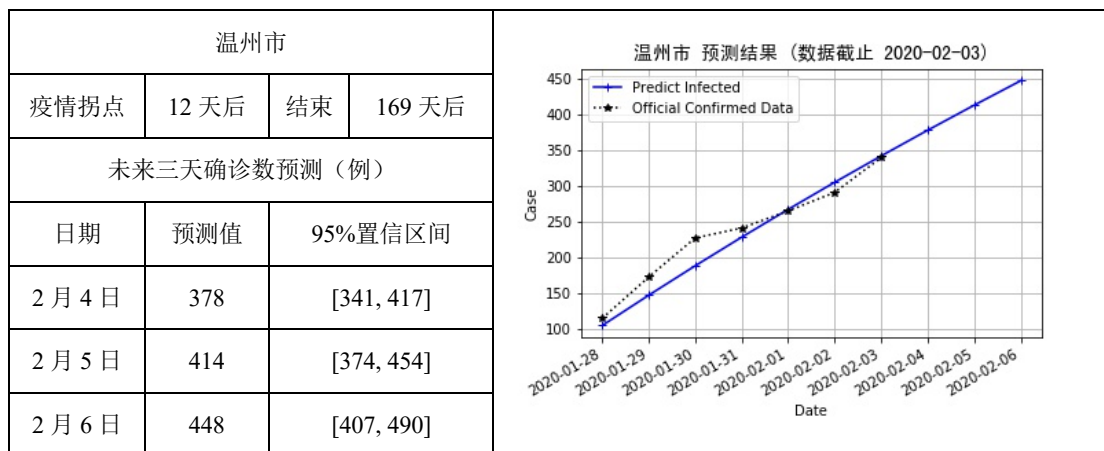


图 44 温州市缓解指数变化趋势图

附录：模型方法

A.1 再生系数计算

基本再生数 (Basic reproduction number): 基本再生系数通常写作 R_0 , 是流行病学上的一个概念, 是指一个感染了某种传染病的人, 会把该病传染给其他多少人的平均数, 数字越大表示该病越难以防控。通过基本再生系数可以反映出当前传染病的传播能力, 是衡量目前该病严重程度的一个重要指标。

本文采用了一种基于最大似然概率利用实时的监测数据来对 R_0 进行估计的方法。假设我们已经得到的感染者数据是一个时序数据 $\mathbf{N}=\{N_t\}, t=0, \dots, T$, 其中 t 是指单位索引, N_t 为在每一个间隔间产生的新的感染人数。

作为一种假设, 我们认为每一个感染个体的继发感染人数是遵循期望值为 R_0 的泊松分布。 N_0 为最初的感染人数, 这些人中的每一个都是根据均值为 R_0 的泊松分布来生成发展其他病例, N_i 表示第 i 天总的新增感染数, X_{ij} 表示第 j 天由 N_i 产生的新增病例。

通过对 X_{ij} 进行求和我们可以得到利用观察 N_t 而得到的泊松分布:

$$L(R_0, p) = \prod_{t=1}^T \frac{e^{-\mu_t} \mu_t^{N_t}}{N_t!}$$

其中有:

$$\mu_t = R_0 \sum_{j=0}^{\min(k,t)} N_j p_j.$$

最终的得到的目标函数如下:

$$\arg \max_{R_0, \vec{p}} \sum_{t=1}^T [-\phi_t(R_0, \vec{p}) + N_t \log(\phi_t(R_0, \vec{p}))]$$

其中有:

$$\begin{aligned} \phi_t(R_0, \vec{p}) &= \sum_{j=1}^k N_{t-j} p_j \\ s.t. \quad \sum_{j=1}^C p_j &= 1 \quad (p_j \geq 0) \end{aligned}$$

为了便于计算机计算, 我们通过对 p_i 建模来缩小参数空间的维数。这里我们使用了两个参数的 Gamma 分布来描述 p_i , 因此 p_i 的近似如下:

$$p_i \propto \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_{j-1}^j x^{\alpha-1} e^{-\beta x} dx$$

从而我们将目标函数近似如下:

$$\arg \max_{R_0, \alpha, \beta} \sum_{t=0}^T [-\phi_t(R_0, \alpha, \beta) + N_t \log(\phi_t(R_0, \alpha, \beta))]$$

其中有：

$$\phi_t(R_0, \alpha, \beta) = \frac{R_0 \sum_{j=0}^k \frac{N_{t-j}}{2} [(j-1)^{\alpha-1} e^{-\beta(j-1)} + j^{\alpha-1} e^{-\beta j}]}{\sum_{j=1}^{k-1} j^{\alpha-1} e^{-\beta j} + \frac{1}{2} k^{\alpha-1} e^{-\beta k}}$$

$$k = \min(t, C) \quad C \text{ 为一个常数}$$

该方法通过对三个参数进行约束优化以通过最大似然估计 R_0 。

A.2 传播过程建模与预测

SEIR 是流行病学研究中广泛使用的传染病传播模型，本文使用该模型对新冠病毒的传播进行建模。SEIR 模型由 Susceptible（易感）、Exposed（暴露）、Infected（感染）和 Removed（出院）四部分人群组成。在每日模型迭代中，各部分更新关系如下：

$$\begin{aligned} \frac{dS_t}{dt} &= -\beta S_{t-1} I_{t-1} \\ \frac{dE_t}{dt} &= \beta S_{t-1} I_{t-1} - k E_{t-1} \\ \frac{dI_t}{dt} &= k E_{t-1} - \gamma I_{t-1} \\ \frac{dR_t}{dt} &= \gamma I_{t-1} \end{aligned}$$

其中，参数 β 为有效接触率， k 为由暴露到感染的发生率， γ 为康复率。

对于待研究城市，通过使用最小二乘法，拟合该城市的累计确诊人数曲线，可得到模型参数 (β, k, γ) 。其中，初始易感人群数 $S(0)$ 取自该城市人口数，初始感染数 $I(0)$ 和出院数 $R(0)$ 取自真实数据。完成参数估计后，可使用模型对未来 3 天的确诊人数进行预测，并通过对预测值进行柏松分布采样获得预测确诊人数值的 95% 置信区间。

参考文献

- [1] Forsberg White L, Pagano M. A likelihood - based method for real - time estimation of the serial interval and reproductive number of an epidemic[J]. Statistics in medicine, 2008, 27(16): 2999-3016.
- [2] Tillet H E. Infectious Diseases of Humans: Dynamics and Control. RM Anderson, RM May, Pp. 757. Oxford University Press; 1991 (£ 50.00)[J]. Epidemiology & Infection, 1992, 108(1): 211-211.
- [3] Bauch C T, Lloyd-Smith J O, Coffee M P, et al. Dynamically modeling SARS and other newly emerging respiratory illnesses: past, present, and future[J]. Epidemiology, 2005: 791-801.
- [4] Cauchemez S, Nouvellet P, Cori A, et al. Unraveling the drivers of MERS-CoV transmission[J]. Proceedings of the national academy of sciences, 2016, 113(32): 9081-9086.
- [5] Lipsitch M, Cohen T, Cooper B, et al. Transmission dynamics and control of severe acute respiratory syndrome[J]. Science, 2003, 300(5627): 1966-1970.
- [6] World Health Organization. Consensus document on the epidemiology of severe acute respiratory syndrome (SARS)[R]. World Health Organization, 2003.