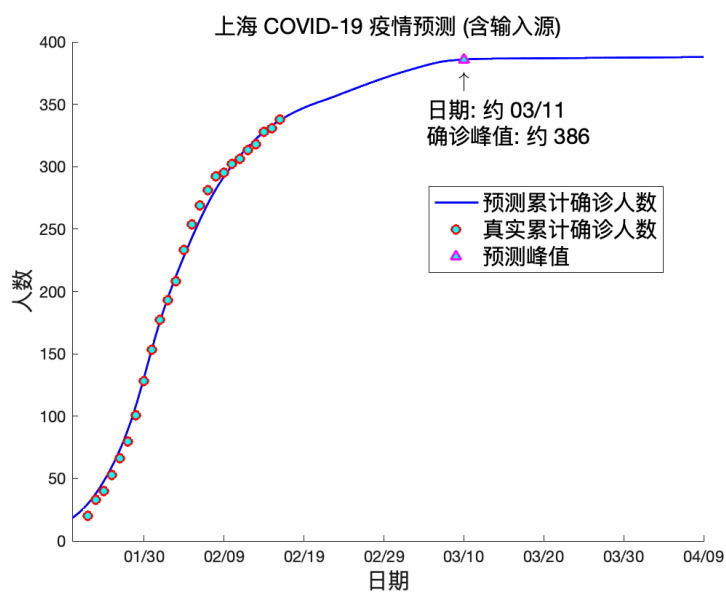




上海市现代应用数学重点实验室研究报告 Research Report Series of SKLCAM

(2020 年第五期)

外部持续输入源和隔离强度对上海新冠肺炎 疫情的影响分析



上海市现代应用数学重点实验室
Shanghai Key Laboratory of Contemporary Applied Mathematics

外部持续输入源和隔离强度对上海新冠肺炎疫情的影响分析

刘可伋, 严阅, 陈瑜, 江渝, 许伯熹

上海财经大学数学学院, 上海市, 200433

随着寒假的过去, 各大高校与中小学将陆续开学, 上海市将迎来外地生源学生的返校潮. 在本报告中, 我们将基于 TDD-NCP 模型, 分别通过外部输入感染者的变化和隔离率 ℓ 的变化, 来分析返校潮对上海市疫情的影响.

1 未来返程输入的感染者对上海的影响

为得到 TDD-NCP 模型中的传染率 β 和隔离率 ℓ , 我们先在零输入的假设下, 利用卫健委公布的上海市 1 月 23 日至 2 月 17 日的累计确诊人数与累计治愈人数, 反演得出现阶段传染率 $\beta = 0.2452$ 与隔离率 $\ell = 0.5541$. 在保持上述传染率与隔离率不变的条件下: (1) 我们从 2 月 17 日至 3 月 8 日, 通过每两日增加 1 例外部输入感染者, 来描述上海各学校即将迎来的返学潮, 该情况下的上海疫情发展预测如图 1.1 (a) 所示; (2) 无外部输入感染者的疫情发展预测结果, 如图 1.1 (b) 所示.

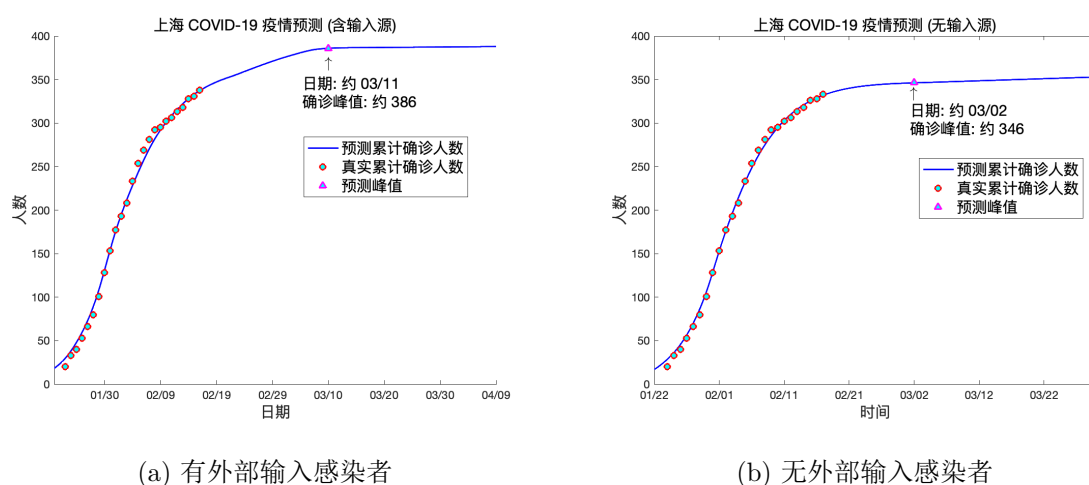


图 1.1: 上海 COVID-19 疫情预测

图 1.1 中, 蓝色实线表示预测的累计确诊人数, 红色圆圈表示卫健委公布的累计确诊人数. 可以看出, 在保持现有防控措施的前提下, 若持续有少量外部输入病例, 我们预测

上海市的累计确诊人数将在 3 月 11 日达到峰值（即疫情拐点），约为 386 人。但如果未来无外部输入病例，则上海市的累计确诊人数预计将于 3 月 2 日达到峰值，约为 346 人。虽然输入源将在一定程度上延长上海的疫情，并使感染人数略有增加，但总体来说，未来持续的少量外部输入病例对上海疫情产生的影响将是十分有限的。在没有大量外部输入病例的前提下，上海 COVID-19 疫情将于 3 月中上旬结束。

2 上海 COVID-19 疫情的防控再生数分析

医学界常关心的传染病基本再生数 R_0 的定义为：在无防控隔离措施并且没人有免疫力的条件下，每个感染者在平均患病周期内传染的人数。基本再生数能够反映传染病本身在自然状态下的传播能力。然而，由于政府为了控制疫情蔓延采取了各类高效的防控措施，因此我们无法通过现有的数据来计算新冠肺炎在自然无防控状态下的基本再生数 R_0 。在此，我们定义新的“防控再生数” R_f ，它是政府采取了防控措施的情况下，每个感染者在平均患病周期内传染的人数。

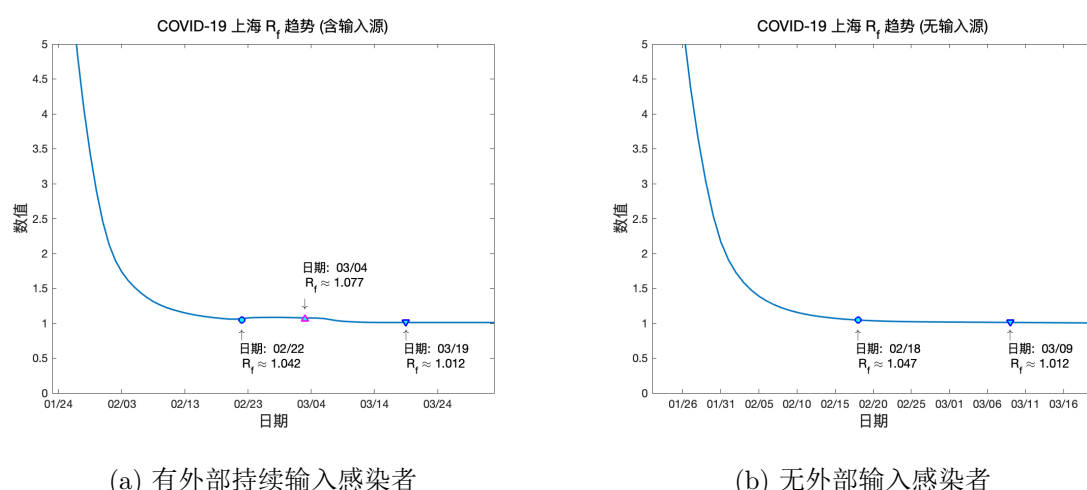


图 2.1: 上海 COVID-19 疫情的防控再生数 R_f 预测

通过可获取的数据，可采用不同的计算方法估计防控再生数 R_f ，下面我们给出其中的一种计算方法：

$$R_f(t) = \frac{I(t + \tau_1)}{J(t)},$$

其中， $I(t)$ 为 t 时刻累计感染人数， $J(t)$ 为 t 时刻累计治愈人数， τ_1 为潜伏期。运用以上公式，我们分别针对有外部输入源（即 2 月 17 日至 3 月 8 日，每两日增加 1 例外部输入感染者）和无外部输入源的情况，计算出每个时刻 t 的防控再生数 $R_f(t)$ ，如图 2.1 所示。

由图 2.1 可知，上海的防控再生数 R_f 在疫情初期是较大的（大于 5），但由于上海的防控措施十分有效，现阶段的防控再生数 R_f 已降至 1.1 以下，这也说明上海 COVID-19 疫情已得到了很好的防控。对比有外部输入源和无外部输入源的防控再生数走势，我们

发现, 若未来有持续少量的外部输入感染者, 防控再生数 R_f 将有微小的上升, 如图2.1(a)所示, R_f 将于 3 月 4 日达到局部的极大值 1.077 后再下降至 1.012 (约 3 月 19 日); 而若未来没有外部输入的感染者, 防控再生数 R_f 将一直保持下降的趋势, 并于 3 月 9 日左右降至 1.012。综上所述, 三月中下旬后, 防控再生数 R_f 将降至 1 附近, 届时新冠肺炎疫情被最终战胜。

3 隔离强度对上海疫情的影响

从前文中可以看到, 若维持现有隔离率 $\ell = 0.5541$ 不变, 上海的疫情还是比较乐观的. 现分析若未来上海放松隔离强度 (即降低模型中的隔离率 ℓ), COVID-19 疫情将如何变化. 假设自 2 月 17 日起上海的隔离率降为约原来的一半, 即 $\ell = 0.27$. 图3.1 (a) 与图3.1 (b) 分别显示了在有外部输入源与无外部输入源的条件下, 降低隔离率对上海疫情的影响. 图3.1 (a) 中, 我们仍假设 2 月 17 日至 3 月 8 日, 每两日增加 1 例外部输入的感染者.

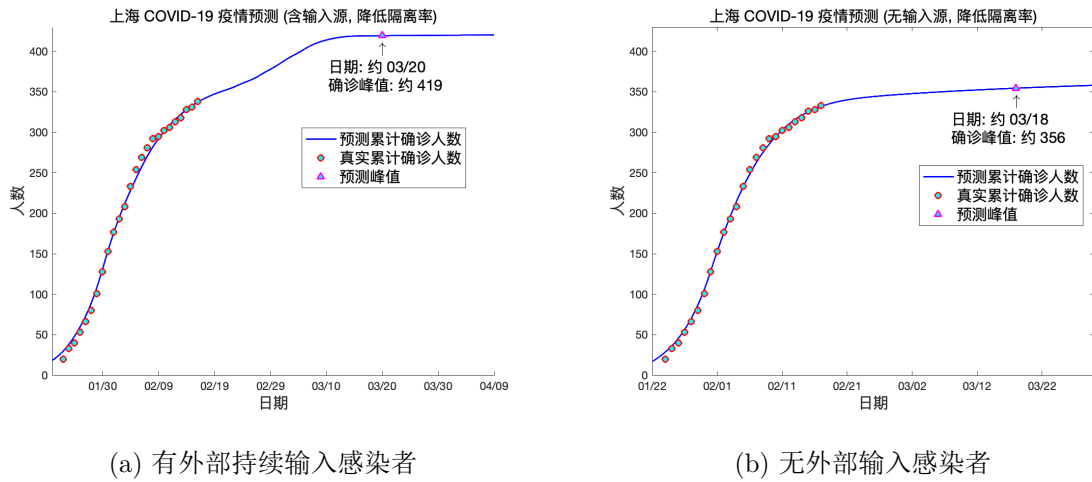


图 3.1: 降低隔离率后上海 COVID-19 疫情预测

对比图3.1与图1.1后我们发现, 降低隔离率将加重上海的疫情: 疫情拐点将向后推迟, 并且累计确诊人数将显著增加. 这说明, 放松隔离对上海疫情的影响远大于持续外部输入源的影响. 特别地, 在降低隔离率的条件下, 我们又将连续输入病例的假设改为每四日增加 1 例, 模拟的结果与图3.1(a) 类似, 在此不再展示. 这也从侧面说明了隔离强度对上海疫情防控的重要性.

同时, 我们也计算了降低隔离率对防控再生数 R_f 的影响. 图3.2展示了降低隔离率后的上海疫情的防控再生数 R_f 曲线. 对比图3.2与图2.1可知, 相较于隔离率不变的情况, 降低隔离率后的防控再生数略有增大, 不利于疫情防控.

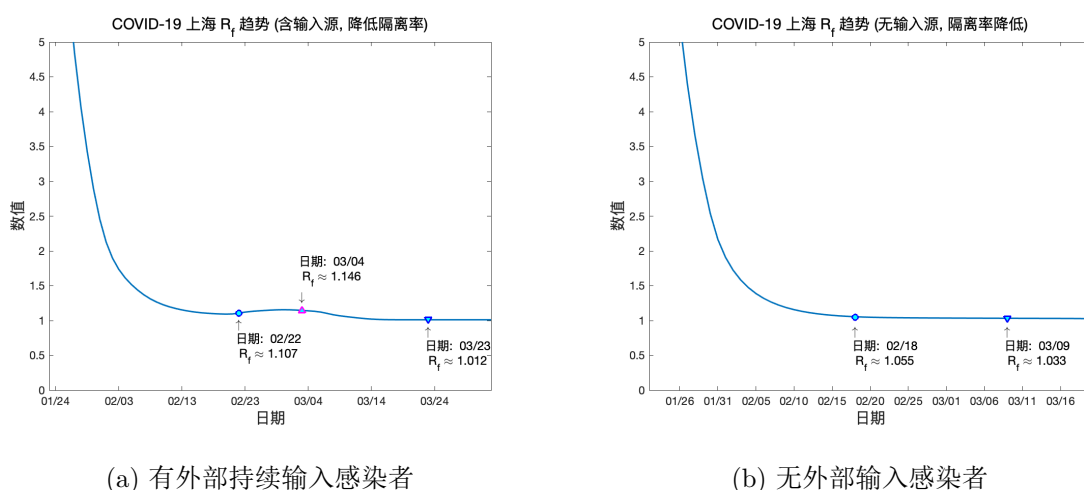


图 3.2: 降低隔离率后上海 COVID-19 疫情的防控再生数 R_f 预测

综上所述, 我们认为隔离强度对上海未来疫情的防控有较大影响, 若保持现有的各项防控措施, 上海疫情将于三月中上旬结束.

参考文献

- [1] B. Cantó, C. Coll and E. Sánchez. Estimation of parameters in a structured SIR model[J]. Advances in Difference Equations, 33, 2017.
- [2] Y. Chen, J. Cheng, Y. Jiang and K. Liu. A time delay dynamical model for outbreak of 2019-nCov and the parameter identification[EB/OL]. To appear in Journal in Inverse and Ill-posed Problems, 2020. arXiv:2002.00418.
- [3] Y. Chen, J. Cheng, Y. Jiang and K. Liu. A time delay dynamic system with external source for the local outbreak of 2019-nCoV[EB/OL]. To appear in Journal in Applicable Analysis, 2020. arXiv:2002.02590.
- [4] B. Kaltenbacher, A. Neubauer and O. Scherzer, Iterative regularization methods for nonlinear ill-posed problems[M]. Radon Series on Computational and Applied Mathematics 6, Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, Berlin, 2008.
- [5] 刘畅, 丁光宏, 龚剑秋等. SARS 爆发预测和预警的数学模型研究 [J]. 科学通报, 49(21): 2245-2251, 2004.
- [6] 刘可伋, 江渝, 严阅, 陈文斌. 局部新冠肺炎时滞模型及基本再生数的计算. 控制理论与应用, 已投稿, 2020.

- [7] 刘逸侃, 徐定华, 程晋. 统计与计算反问题 (译)[M]. 芬兰 Erkki Somersalo, Jari Kaipio 著. 北京: 科学出版社, 2018.
- [8] 马知恩, 周义仓. 传染病动力学的数学建模与研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [9] L. Qun, G. Xuhua, W. Peng, W. Xiaoye, Z. Lei, T. Yeqing, R. Ruiqi, et al. Early Transmission Dynamics in Wuhan, China, of Novel Coronavirus-Infected Pneumonia[J/OL]. N Engl J Med, 2020. DOI: 10.1056/NEJMoa2001316.
- [10] 邵年, 陈瑜, 程晋, 陈文斌. 关于新型冠状病毒肺炎一类基于 CCDC 统计数据的随机时滞动力学模型. 控制理论与应用, 已投稿, 2020.
- [11] 严阅, 陈瑜, 刘可伋, 罗心悦, 许伯熹, 江渝, 程晋. 基于一类时滞动力学系统对新型冠状病毒肺炎疫情的建模和预测 [J/OL]. 中国科学: 数学, 50(3), 1-8, 2020. DOI: 10.1360/SSM-2020-0026.