

· SARS 传播动力学模型 ·

应用系统动力学模型对 SARS 疫情传播及
主要防控措施效果的计算机模拟仿真研究

曾哲淳 赵冬 李岩 郭强 石鹏 李哲 印惠俊 李洋

【摘要】 目的 (1)应用系统动力学方法建立数学模型,宏观地模拟严重急性呼吸综合征(SARS)疫情在自然人群和医院内传播的过程,以及患者通过就诊和社区隔离措施移出传播链的过程。(2)通过计算机对该模型的仿真模拟,分析在突发 SARS 疫情的情况下,代表主要防控措施的变量对疫情曲线的影响模式和相对强度。(3)重点分析发热监测措施对疫情的影响,根据分析结果对今后 SARS 防控工作提出政策建议。**方法** 采用面谈、问卷调查、文献检索、个案分析等方式,获取 SARS 传播的重要参数。应用系统动力学理论及计算机仿真系统建立数学模型,并进行 What-if 仿真分析。**结果** 建立了能够反映 SARS 自然传播、患者就诊及医院内传播、社区隔离措施、发热监测过程的计算机仿真模型,通过宏观模拟 SARS 患者从发病到被移出传播链的过程得出下列结果:(1)患者从发病到就诊的时间、患者每日平均接触人数、就诊时医院内接触人数等是对 SARS 的院内、院外传播过程影响最大的几个变量;(2)隔离强度、接诊医生对 SARS 的警惕性、医院通风消毒、医院优化患者流动路线、医生防护强度是影响疫情控制的主要变量;(3)医院入口的体温筛查措施对疫情控制的作用不大。**结论** 按照目前制定的 SARS 防治预案,卫生系统能够快速控制突发的 SARS 疫情。

【关键词】 严重急性呼吸综合征;系统动力学模型;计算机模拟

The application of a systematic-dynamic model to study the computer simulation of severe acute respiratory syndrome transmission and the impact of control measures ZENG Zhe-chun*, ZHAO Dong, LI Yan, GUO Qiang, SHI Peng, LI Zhe, YIN Hui-jun, LI Yang. Department of Epidemiology Beijing Institute of Heart Lung and Blood Vessel Disease, Beijing 100029, China

【Abstract】 Objective (1) Building a macroscopical systematic-dynamic model of severe acute respiratory syndrome(SARS) transmission and disease control process. (2) To determine key variables on the control of SARS epidemic through computer simulation methodology, especially to analyze the effect of "screening for fever" practice during the epidemics. (3) To provide evidence for related decision-making. **Methods** Parameters in the model were collected from local hospitals and municipal CDC through interview, questionnaire survey, literature review and case analysis. A systematic-dynamic model was built under similar studies. "What-if" analysis was used during the simulation process. **Results** (1) The mean duration between disease onset and hospital admission, rate of contacts of each infectious individual as well as the rate of contacts in hospital of each infectious individual appeared to be the key variables in the process of SARS transmission. (2) Physician's alertness/sense and practice of self-protection on SARS, measures on quarantine and isolation to the patients, ventilation and disinfection process in the wards appeared to be the key variables for the control of epidemics. (3) "Screening for fever" practice on each patient at the entrance of the hospital did not seem to act as an important factor to the control of the epidemics. **Conclusion** The health system in Beijing can control SARS epidemic rapidly based on current applied disease control measures and plan.

【Key words】 Severe acute respiratory syndrome; System dynamic model; Simulation

虽然严重急性呼吸综合征(SARS)的爆发性流

行已经结束,许多研究对 SARS 防控的经验教训进行了总结,各地卫生系统也制定了较全面的 SARS 防治预案,但对于 SARS 流行过程中各种因素的作用大小,以及具体防控措施对疫情控制的贡献等问题的认识仍然有限。此外,当再次突发不同程度的疫情时,各类防治预案对疫情的应对是否有效而适

基金项目:国家“863”科技攻关课题资助项目(2003AA208412D)

作者单位:100029 北京安贞医院心肺血管疾病研究所流行病学研究室(曾哲淳、赵冬、李岩);北京市卫生局信息中心(郭强);北京市朝阳区疾病预防控制中心/卫生监督所(石鹏、李洋);民航总局卫生处(李哲);北京铁路局卫生防疫站(印惠俊)

度,许多主观因素对预案执行会产生什么影响等问题仍需进一步研究。然而,SARS 疫情传播与防控是不可能通过试验的方式进行研究的,实战模拟演习虽然效果好,但成本较高,组织实施和评价比较麻烦。为此,我们应用系统动力学和计算机仿真技术对 SARS 疫情的防控过程进行模拟的试验性研究。本文仅对 SARS 在当地的传播和防控过程进行分析。

资料与方法

采用面访、问卷调查、国内外文献检索、个案分析、历史数据采集等方式,获取 SARS 传播的重要参数。

1. 调查内容:①发热监测调查:以问卷调查和访谈的方式,获取北京市 2003 年 63 家设立发热门诊的医院、首都机场、火车站、长途车站、公路关口等处 SARS 流行期间发热监测的数据,以及医院运行管理模式、病例流量、防控措施等信息。②隔离措施相关数据:通过对北京市疾病预防控制中心有关人员的访谈以及相关文献检索获得。③确诊 SARS 患者电话调查:对北京市 158 例确诊 SARS 患者进行电话调查,获得从发病到就诊过程中的有关数据。④其他相关数据:人口学、流行病学等有关数据通过文献检索或参考类似研究获得。

2. 模型建立和参数估计及计算机仿真分析:在参考类似研究及其他模型的基础上,使用 Vensim 5.0 软件建立系统动力学模型,模型中参数估计的方法有三种:①根据对医疗机构、疾病预防控制部门和交通关口的调查访问获得某些参数的总体均值;②对于无法通过调查得到的参数,通过文献检索获得国内外相关研究中发表的数值;③主观变量通过一些取值范围在 0~1 之间的系数代表主观作用的强弱(1:代表强,0:代表无),它们的用途是通过模拟,寻找主观因素对疫情影响的大小,在模拟时一般采用比较保守的初始值 0.5 左右。仿真过程中使用 What-if 分析法,即假设有一定程度的疫情发生后,通过调整模型中某些参数的取值,由计算机模拟疫情曲线随时间的变化趋势,分析不同变量对疫情影响的方式和强度。

3. 统计学分析:使用微软 Access 2003 数据库系统收集数据,SPSS 11.0 软件进行统计分析。

结 果

1. 系统动力学模型的建立:SARS 的传播和防

控是一个非线性的、动态反馈复杂系统,系统动力学模型很适合研究这类问题。发病但未被隔离的 SARS 患者,其社会活动是造成自然人群中传播和医院内传播的主要驱动力,因此建立系统动力学模型的目的是宏观地模拟突发 SARS 患者从发病到被移出传播链的过程(患者通过就诊被隔离观察或在社区内隔离观察,从而失去继续传播的可能)。

计算机仿真的起点是在正常状态下,对突发一定数量的 SARS 病例,这些病例可能经过人群传播、就诊、发热筛查、院内交叉感染、被隔离、隔离密切接触者等环节。具有传播能力的 SARS 病例被移出传染链的过程是建立模型的重点(从发病到就诊时被隔离观察或从社区被隔离)。建模的过程中参考了其他类似研究的经验^[1-7]。模型的概念结构如图 1、2。模型的主要任务就是建立代表各个环节的主要变量之间的函数关系。

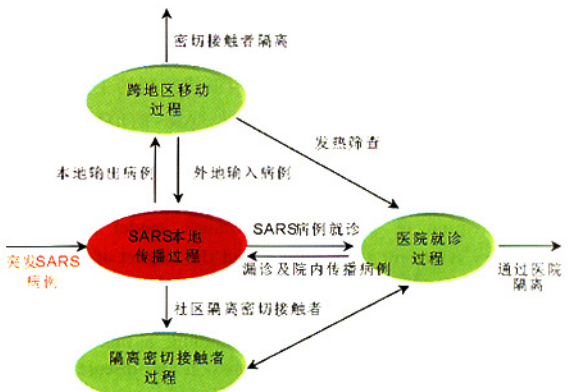


图1 SARS 疫情动力系统模型总体概念框图

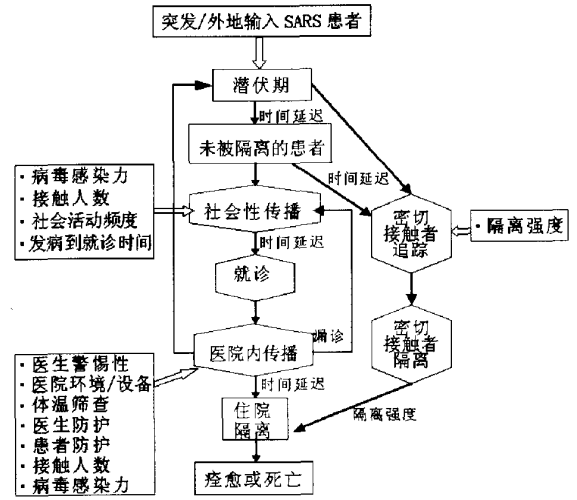


图2 SARS 疫情动力系统模型详细概念框图

2. 主要变量的数学模型:

(1)模型结构:图 2 是系统动力学模型的详细结构,其中矩形代表积分变量(或称存量)、六边形代表微分变量(或称流量),黄色部分中为辅助变量,箭头代表变量之间具有函数关系。

(2)某时刻(t)社会上具有传播能力的 SARS 病例数(Y_t):

$$Y_t = \int_0^t \{ [(Y_{t-1} \times k \times b + H_{t-1}) / T] + I_{t-1} - Q_{t-1} - D_{t-1} \} dt \tag{1}$$

式中 Y_{t-1} 为前一时刻社会上有传染能力的病例数, k 为单位时间内每例患者接触的人数, b 为每次接触后被感染 SARS 的概率。 T 为潜伏期天数。 H_{t-1} 为前一时刻发生的院内感染数, I_{t-1} 为外地输入患者数, Q_{t-1} 为前一时刻通过社区隔离的病例, D_{t-1} 为通过入院就诊被隔离的病例。初始时刻 t_0 , Y_0 等于模拟时指定的突发 SARS 病例数。

(3)每次就诊造成的院内感染例数(H_t):

$$H_t = \int_{t-\tau}^t (y_{t-\tau} \times K \times b) dt \tag{2}$$

式中 $y_{t-\tau}$ 为就诊的 SARS 病例数, τ 为每次就诊持续时间。

(4)通过入院就诊被隔离的病例数(D_t):

$$D_t = \int_{t-\tau}^t (y_{t-\tau} \times P) dt \tag{3}$$

式中 P 为 SARS 病例就诊的平均检出率。而 P 是受到医生警惕性、症状特异性、发热筛查检出率等因素影响的复合函数。

3. 模型参数的意义、取值及依据:仿真过程中可调控的参数分为三类(表 1),分别用于反映人群自然传播、院内传播、SARS 的检出和隔离措施。其中包括一些变量用于半定量的代表主观指标。所有调控指标均可在仿真过程中适时调节,其初始值则通过调查、检索等方法获得。

4. 不同防控措施对疫情曲线的影响模式及仿真分析:仿真计算的流程如图 3,其中所列数据均为计算机仿真的结果,而不是实际调查的数据。

(1)“发病到就诊时间”变化的影响:假定突然发生 30 例 SARS 病例, SARS 潜伏期 7 天,发病到入院时间分别取 2、3、4 天,用模型模拟结果为:患者 2 天后入院与 3 天后入院相比, SARS 发病总人数约减少 32% (24 例);疫情得到控制的时间缩短约 15 天。患者 2 天后入院与 4 天后入院相比, SARS 发病总人数约减少 56% (70 例);疫情得到控制的时间缩短约 50 天。说明:在模型中“发病到就诊时间”影响疫情的原因是减少具有传播能力的 SARS 患者在社会上活动的时间,从而减少密切接触者和后代传播。

表1 SARS 疫情动力系统模型主要参数

指 标	取值范围	参 数 意 义 及 依 据
突发 SARS 病例数	≥ 1	仿真的起点,用于考查在不同严重程度的突发疫情下模型的反应。该变量由研究者指定
每日平均接触人数	10	综合反映人群交往程度的指标。数据来源参考文献[4]
潜伏期天数	2~10, $x=7$	数据来源中华医学会、中华中医药学会“传染性非典型肺炎诊疗方案”(2003 年 9 月 30 日)
密切接触者发病率	$x=6.3\%$, 配偶为 15.4%; 同事和同学 0.36%	密切接触者中发生 SARS 的比例,数据来源参考文献[8]
发病到就诊时间	20~45 h	从患者出现症状到去医院就诊的时间间隔。本研究的数据是对北京市 158 例确诊 SARS 患者进行电话调查的结果
发热患者检出率(%)	50(人为设定)	发热患者被医院人口的发热筛查点检出的概率。无文献报道该参数,但根据参考文献[8,9]中的内容推测,该参数不会超过 50%,模拟计算过程中有意将该参数高估
每次就诊接触其他病例数	100	反映患者在医院中流动程度的指标,数据来源参考文献[4]
每次就诊接触的医务人员数	6	
医务人员每日平均接触患者例数	50	用于医生与病例接触程度的指标,数据来源:根据综合医院医生每日门诊量估算半定量的指标,0=无防护,1=完全防护,0~1 之间其他数值代表不同的防护强度
医务人员防护系数*	0.8	
医生警惕性系数*	0.8	半定量的指标,用于综合地表达医生对 SARS 防控意识的指标。0=完全忽视 SARS,1=非常重视,能主动询问患者工作性质、野生动物接触史、疾病传染史,并能进行必要检查
医院环境系数*	1	半定量指标,综合反映医院通风消毒状况
隔离强度(%)	60	综合反映能够被有效隔离的密切接触者比例,数据来源参考文献[4]
完成密切接触者隔离所需时间(d)	$x=2$	对能够被隔离的密切接触者实施隔离所需时间,用于综合反映寻找并隔离密切接触者的难易程度以及疾病预防控制中心流调人员的工作效率。数据来源:通过本研究对疾病预防控制中心有关人员的访问获得
外地出入 SARS 病例	0	本文仅对当地的传播和防控过程进行模拟

* 该指标人为设定,并在仿真过程中人为调节,用于模拟半定量指标对疫情的作用

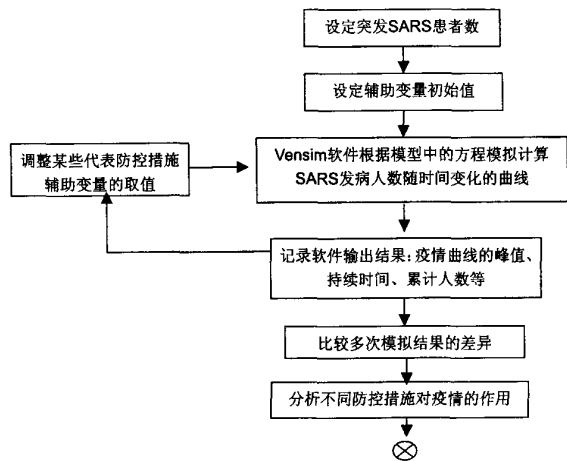


图3 SARS 疫情动力系统模型仿真计算流程

(2)“完成密切接触者隔离所需时间”对疫情的影响:仍然假定突然发生 30 例 SARS 病例,设定隔离强度为 60%,即有 60%的密切接触者能够被隔离,分别取“完成隔离时间”为 2、3、4 天,模拟结果为:2 天完成与 3 天完成相比,SARS 发病总人数约减少 8%(4 例);疫情得到控制的时间缩短约 10 天。2 天完成与 4 天完成相比,SARS 发病总人数约减少 11%(6 例);疫情得到控制的时间缩短约 15 天。说明完成隔离所需时间对疫情影响与疾病预防控制部门的反应速度、隔离强度、疾病的潜伏期有关,如果疾病预防控制部门能够在“上一代患者就诊日期 + SARS 潜伏期天数”这一时间段内将感染 SARS 的密切接触者隔离,则这些患者就失去了二次传播的能力,从而减缓疫情。

关于隔离强度对疫情的影响,其他文献已有分析^[4],不再赘述。

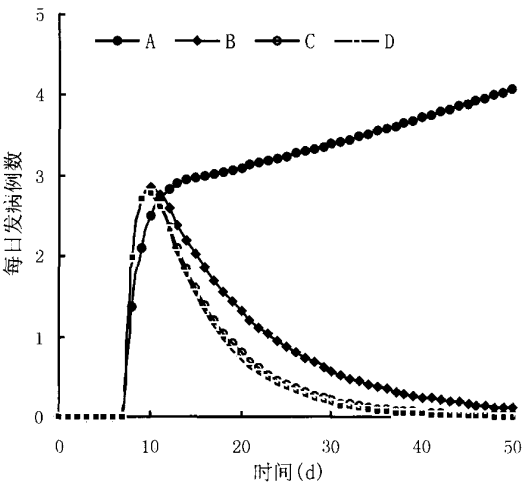
(3)医院发热筛查措施对疫情的影响:北京市“非典防治预案”中将警戒级别分为三级,本研究模拟了在不同警戒级别下,保持其他条件不变,发热筛查措施的效果(表 2)。结果说明:医院发热筛查的目的是为了将 SARS 患者封堵在医院之外,使其尽快到发热门诊就诊,减少院内交叉感染的机会。但由于受到患者配合程度、季节、仪器准确性、病例流量、工作认真程度等多种因素的影响,筛查的检出率不高^[9-11],模拟过程中假定筛查的检出率能够达到 50%。

(4)不同防控措施的组合对疫情的影响:假设有 30 例突发 SARS 病例,通过模型模拟在不同的防控措施组合下疫情的变化。图 4 模拟不同措施组合下,每日新发 SARS 病例数的变化;图 5 模拟不同措

施下,最终累计 SARS 病例总数的变化(A 的累计数为疫情第 80 天时的数字,其他为疫情结束时的最终数字)。

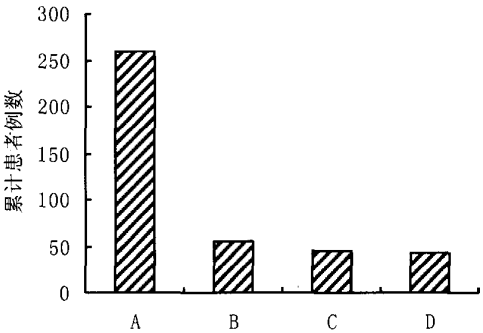
表2 北京市防治 SARS 不同预警状态下发热筛查效果的模拟数据

预警级别	发病总例数		疫情缩短天数
	无发热筛查	发热筛查	
一	1.8	1.6	5
二	11.2	9.7	8
三	56.0	50.0	10



A:无措施;B:提高医生警惕性(加强发热病例的病史询问、理化检查),加强医务人员防护强度,启动密切接触者跟踪和隔离措施;C:以 B 为基础,加强医院对交叉感染的防护强度;D:以 C 为基础,启动发热筛查措施

图4 每日新发 SARS 病例数比较的变化



注:A、B、C、D 同图 4

图5 最终累计 SARS 病例数的变化

从 B、C 两条曲线看,提高医务人员的警惕性、采取针对院内传播的综合控制措施和适当减少社会人员流动等措施可明显缩短疫情、减少发病总数,然而,D 曲线反映发热筛查措施对疫情的控制作用不太明显,即使有意调高检出率参数,发热筛查对疫情

控制的贡献仍然不如其他措施的效果明显。说明,防护强度、警惕性等主观指标通过模型中的半定量系数模拟。

讨 论

系统动力学理论解决问题的特点在于建立数学模型,从系统内部的结构入手进行建模,同时借助计算机仿真技术来研究系统结构功能和动态行为之间的内在关系,从而找到解决问题的对策。它可用于研究高阶次、非线性、多回路的复杂系统的功能和行为,是一门综合自然科学和社会科学,可提高决策科学性的横向学科,在许多领域有广泛应用^[11],同样也适用于分析 SARS 疫情传播与防控这类问题的研究。

在能够迅速控制疫情的前提下,尽量减少防控措施对国民经济和人们正常生活的干扰是传染病防控的目标之一。通过模拟分析的结果,可以得出以下结论:①发现病例从发病到就诊的时间、患者每日平均接触人数、就诊时医院内接触人数、隔离强度、实施隔离所需时间等是对 SARS 的院内、外传播过程影响最大的几个变量。②接诊医生对 SARS 的警惕性、医院防护强度、医生防护强度等半定量指标对疫情控制同样存在重要影响。③即使在有意高估检出率的情况下,发热筛查措施对疫情控制的效果仍不明显。④按照目前制定的 SARS 防治预案,卫生系统能够快速控制突发的 SARS 疫情,而不必采用影响全社会的减少人员流动和接触的措施。

对于发热到就诊时间、平均接触人数等因素,卫生行政部门不可能对它们产生直接影响,只能通过加强传染病知识和防疫意识的宣传,向社会公开疫情变化等手段间接发挥作用。而隔离强度、实施隔离所需时间等因素可以通过建立较为完善、覆盖面广的症状登记和报告系统,加快医院与疾病预防控制部门的信息交换等措施加强。对于医生警惕性、医生防护、医院交叉感染等因素可以通过完善管理和监管制度等措施提高。

综上所述,对今后 SARS 防治工作提出建议:①通过宣传、检查、制定诊疗流程等多种方式提高医生对 SARS 的警惕性,增加对发热患者工作性质、野生动物接触史、发热传播史的询问,增加必要的理化检查,对可疑病例及时隔离观察,由医生或护士对发热患者做必要的防治传染病的行为指导;②增强医生

出诊时的防护强度,尤其是在呼吸道传染病高发的冬春季节;③鼓励各医院改善门诊、急诊通风消毒条件,改善布局优化就诊的活动路线;④增强群众传染病防治知识的宣传,提高防治意识使患者在发病时能够有意识减少交往,迅速就诊,当有疫情发生时建立向社会公布疫情的制度;⑤鼓励医院加强门诊、急诊患者的住址、联系方式、就诊时间的登记工作,从而方便对密切接触者的寻找,加速切断传播链;⑥完善疾病症状监测信息系统的建设,将症状监测作为医院一项常备不懈的日常工作,利用计算机网络加快医院与疾病预防控制部门的信息沟通;⑦在上述建议及目前防控措施的监控下,卫生系统有能力快速控制突发的 SARS 疫情,对于三级以下疫情不必采用影响全社会的减少人员流动和接触的措施;⑧医院应在有可疑病例隔离观察时,立即向疾病预防控制部门通报,后者应在接到通报后尽快开始寻找密切接触者的工作;⑨当出现二级以上预警时,各医院可根据自身情况自行决定是否启动体温筛查措施。

参 考 文 献

- 1 Christophe F, Steven R, Roy MA, et al. Factors that make an infectious disease outbreak controllable. PNAS, 2004, 101: 6146-6155.
- 2 Marc L, Ted C, Ben C, et al. Transmission dynamics and control of severe acute respiratory syndrome. Science, 2003, 300: 1966-1970.
- 3 Steven R, Christophe F, Christl A, et al. Transmission dynamics of the etiological agent of SARS in Hong Kong: impact of public health interventions. Science, 2003, 300: 1961-1966.
- 4 龚建华,孙战利,李小文,等. SARS 疫情控制的模拟分析. 遥感学报, 2003, 7: 260-265.
- 5 石耀霖. SARS 传染扩散的动力学随机模型. 科学通报, 2003, 48: 1373-1377.
- 6 齐欢,王小平. 系统建模与仿真. 北京:清华大学出版社, 2004. 7.
- 7 Gene FF, David P, Abbas EE, et al. 动态系统的反馈控制(中文第 4 版). 北京:电子工业出版社, 2004. 5.
- 8 Pang X, Zhu Z, Xu F, et al. Evaluation of control measures implemented in the severe acute respiratory syndrome outbreak in Beijing, 2003. JAMA, 2003, 290: 3251-3253.
- 9 Gina S, Mahomed P, Jenean S, et al. Border screening for SARS in Australia: what has been learnt? MJA, 2004, 180: 220-223.
- 10 门可,闫永平,卢青,等. 北京市发热筛查在防控 SARS 中作用的评价. 中国全科医学杂志, 2003, 6: 535-536.
- 11 梁万年. 北京市 SARS 干预措施的效果效益评价. 预防医学文献信息, 2003, 9: 766-768.

(收稿日期:2004-11-04)

(本文编辑:张林东)