

文章编号: 1007-4619 (2003) 04-0260-06

SARS 疫情控制的模拟分析

龚建华¹, 孙战利¹, 李小文¹, 曹春香¹, 李小英¹, 钱贞国¹, 周洁萍¹

(1. 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101; 2. University of Illinois at Urbana-Champaign, 美国)

摘要: 应用系统动力学模型, 定量地分析“早发现、早隔离、早治疗”措施, 对于控制 SARS 疾病扩散与传播的重要性。结果表明, “得病后入院时间”与“隔离措施强度”对于 SARS 疫情态势发展, 具有很大的敏感性与相关性, 其中得病后的患者几时去医院治疗, 对于疫情的控制具有更重要的意义。同时应用动力学模型, 对北京的 SARS 疫情进行分时间段的模拟与 SARS 实施控制因素影响分析, 结果表明, 2003-04-20 以后一段时间内实行的各种控制措施, 以及 5 月 1 日—5 月 5 日的长假对于北京 SARS 疫情的控制是非常有效的; 而 4 月 27 日左右北京市社会上未得到有效控制的 SARS 病人数达到高峰, 是最危险的时期。5 月 20 日以后, 北京的 SARS 疫情基本保持在低发的平台期, 但是如出现较多的外来 SARS 病例输入, 而内部隔离强度又减弱、社交活动增加等情况下, 北京 SARS 疫情可能会有一定程度的波动与反弹。

关键词: SARS; 系统动力学; 模拟; 控制措施

中图分类号: R181.8/N94 **文献标识码:** A

1 引言

SARS (Severe Acute Respiratory Syndrome) 即严重急性呼吸道综合症 (传染性非典型肺炎), 是一种新的、传染性很强的疾病, 它在中国部分地区的暴发与蔓延, 严重威胁了人民的健康与生命安全, 影响中国的社会稳定与经济发展。对于 SARS 疾病传播与扩散的时空特征与规律、未来发展态势、以及 SARS 疫情控制措施效果的科学评价等问题, 已引起学者的关注与探讨^[1-6]。Domnelly 等应用统计分析方法^[3], 研究香港的影响 SARS 传播的因子特征以及公共健康防疫措施的作用, 并认为缩短病人从 SARS 发病到医院就医的时间, 是 SARS 防疫中最应优先考虑的关键措施。在 2003-05-23 发表在 Science Express 上的 SARS 研究专题中^[4-6], Lipsitch 等与 Riley 等分别依据新加坡与香港的 SARS 疫情统计数据, 建立了动态数学模型。Lipsitch 等^[4], 对不同防治措施的效果进行模型分析后发现, 采取早检测、隔离等措施, 能明显延缓 SARS 的流行, 这些措施如果结合起来使

用则有更好的效果。Riley 等^[5], 重点对香港发生 SARS 疾病蔓延的前 10 个星期的状况进行了研究, 经过计算分析, 得到香港在 SARS 疫情暴发的初期, 每一个 SARS 病源在 8—12 天内平均感染 2.2—3.6 人; 并认为, 香港凭借现有的公共卫生防治措施能成功地控制住 SARS 传播, 其中比较有效的手段是缩短发病到医院就医 (并隔离) 的时间、有效地实施对与 SARS 病人密切接触人员的跟踪、降低医院 (社区中) 感染者与其他人群的接触几率等。本文则依据系统动力学原理与方法, 基于北京的 SARS 疫情统计数据, 从系统动态反馈机制上研究 SARS 疫情态势发展特征以及防疫措施对于控制 SARS 疫情的作用程度。

2 系统动力学模型设计

SARS 疾病在开始出现时, 由于社会对 SARS 疾病缺乏了解, 加上现代社会人口的高流动性, SARS 会出现快速的传播与扩散。但随后, 当人们发现 SARS 是一种新的、具有很强传染性的疾病, 对人们的健康与生命构成极大威胁的时候, 社会系统就会

收稿日期: 2003-06-02; 修订日期: 2003-06-07

基金项目: 国家自然科学基金主任基金项目“SARS 传播时空模型研究”(40341002), 863 计划课题“SARS 流行病学资料的实时收集、分析和趋势预测”(2003AA208401), 中国科学院遥感应用研究所知识创新工程项目(CX030004 与 CX020021)的资助。

作者简介: 龚建华(1965—), 男, 博士, 中国科学院遥感应用研究所研究员, 研究方向: 地学可视化, 虚拟地理环境与区域可持续发展, 发表学术论文 40 余篇, 专著 1 部。Email: jianhuagong@sina.com, 虚拟地理环境网站: www.vgclab.org

作出反应,采取各种措施如疫情信息周期公示、可能受感染人群或社区隔离、建立 SARS 治疗定点医院,在医院设立发烧门诊部、量测体温、旅行时填写个人健康表等政策与方法,以防止 SARS 疫情态势进一步发展。所以,本文认为 SARS 传播与控制系统,是一个非线性的、动态反馈复杂系统。

系统动力学方法,可以用于研究与处理具有高阶次、非线性和多回路特点的复杂系统,它是以定性定量相结合的方法研究系统结构,可以模拟复杂性系统的功能与行为^[7,8]。依据系统动力学原理,我们设计了 SARS 疾病传播与控制系统的动力学概念模型(图 1)。该模型把人分为健康人群、SARS 感染者(潜伏)、与 SARS 发病者。SARS 感染者,包括

外地输入者、医院里被感染的医务人员、以及通过家属、就医与社会交往的 SARS 感染者;SARS 发病者,是由 SARS 感染者转化而来或由外地直接输入。SARS 发病者,如果停留在社会上,则可能会感染他人;一般地,经过一段时间,会到医院就诊、治疗。在医院,SARS 发病者,可能会感染医护人员、以及其他就医者。最后,SARS 发病者,经过治疗,健康出院;或者,由于种种原因,不治死亡。为了控制 SARS 疫情,可以通过加强个人防护与减少社会活动、采取早发现、早治疗、早隔离措施,减少 SARS 发病者在社会上继续感染他人的机会;在医院里,通过加强医护人员的防护措施,减少医护人员以及医院里的其他就医者的感染机会;同时依靠科学、加强措施,降低病死率。

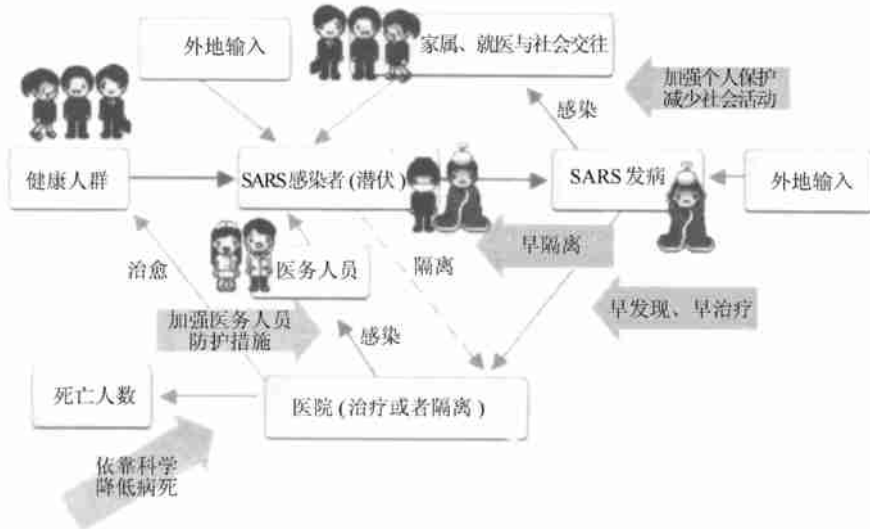


图 1 SARS 系统动力学概念模型

Fig. 1 Conceptual model of system dynamics of SARS

在动力学模型中,本文研究并设计了 6 个主要调控参数,预测受影响(感染、治愈、死亡)人数在不同的参数控制之下随时间的变化。6 个调控参数如下:SARS 潜伏期天数,得病后入院时间,SARS 感染率,隔离措施强度,个人的每天接触交往人数,地区外每天输入病例数。其中,“SARS 潜伏期天数”,表示健康者被 SARS 感染后到发病的时间,“得病后入院时间”参数表示“得病后的患者第几天去住院治疗,以天为单位”,“SARS 感染率”表示“一个 SARS 病源在一定时间段内平均感染的人数,感染率具体可由在家庭、医院以及社会上的感染率组成”,“隔离措施强度”表示“当前潜伏期内的患者有多少人被隔离,以百分比表示”。本文应用 stella 软件系统进行动力学模型的计算与模拟。

3 不同参数及不同参数取值的调控模拟与分析

“早发现、早隔离、早治疗”是控制 SARS 疫情发展的重要政策措施。本文选择“得病后入院时间”与“隔离措施强度”两个参数,定量研究“早发现、早隔离、早治疗”政策,对于控制 SARS 疫情的作用与重要程度。

3.1 “得病后入院时间”参数变化的模拟分析

在动力学模型其他参数设定的条件下,模拟不同“得病后入院时间”参数取值条件下,“SARS 发病总人数”与“SARS 疫情基本控制时间”的变化特征。

其他设定的参数值: 设定 SARS 发病人数的初始值, 假设为 890 个; SARS 潜伏期天数 7d; SARS 感染率(7d 内) 3.85 个; 隔离措施强度 50%(当前潜伏期内有 50% 人被隔离); 个人的每天接触交往人数 10 个; 地区外每天输入病例数 0 个”。

对“得病后入院时间”参数取 1.5d、2.0d 与 2.5d 3 种不同数值后, 对模型进行计算模拟, 可获得:

- SARS 病人 1.5d 后入院与 2d 后入院相比, SARS 发病总人数约减少 30%; SARS 疫情得到控制的时间可能会提前 1 个月。

- SARS 病人 1.5d 后入院与 2.5d 后入院相比, SARS 发病总人数约减少 48%; SARS 疫情得到控制的时间可能会提前 1 半个月。

3.2 “隔离措施强度”参数变化的模拟分析

在动力学模型其他参数设定的条件下, 模拟不同“隔离措施强度”参数取值条件下, SARS 发病总人数与 SARS 疫情基本控制时间的变化特征。

其他设定的参数值: 设定 SARS 发病人数的初始值, 假设为 890 个, SARS 潜伏期天数 7d, SARS 感染率(7d 内) 3.85 个, 病人发病 2 天后住院, 个人的每天接触交往人数 10 个, 地区外每天输入病例数 0 个。

对“隔离措施强度”参数取 40%、50% 与 60% 三种不同数值后, 对模型进行计算模拟, 可获得:

- 隔离措施强度 60% 与隔离措施强度 50% 相比, SARS 发病总人数约减少 16%; SARS 疫情得到控制的时间可能会提前半个月。

- 隔离措施强度 60% 与隔离措施强度 40% 相比, SARS 发病总人数约减少 23%; SARS 疫情得到控制的时间可能会提前 1 个月。

上述研究表明, “得病后入院时间”与“隔离措施强度”对于 SARS 疫情态势发展, 具有很大的敏感性与相关性, 其中得病后的患者几时去医院治疗, 对于疫情的控制具有更重要的意义。所以, “早发现、早隔离、早治疗”, 能够帮助我们有效地、较快地控制 SARS 疾病的扩散与传播。

4 北京 SARS 疫情分时间段实施控制因素的影响分析

应用动力学模型, 对北京的 SARS 疫情进行分时间段的模拟与 SARS 实施控制因素影响分析。

时间段分为: 3 月 5 日—4 月 20 日, 4 月 20 日—5 月 1 日, 5 月 1 日—5 月 5 日, 5 月 5 日—5 月 20

日。时间段选择理由是: 3 月 5 日是北京 SARS 首例输入(来自山西的于某), 4 月 20 日前, 社会基本没有采取有效控制措施; 4 月 20 日后政府与社会开始 SARS 的预防与控制; 5 月 1 日—5 月 5 日, 是法定假日, 期间社会活动大大减少。

对于每个时间段, 我们选择如下参数: 入院时间, 隔离强度, 社交人数, 感染率, SARS 病人接触医务人员的人数, 地区外 SARS 输入人数。

以北京的 SARS 疫情为研究案例, 根据政府公告与媒体公开的 SARS 数据设定模型参数与参数取值, 进行模拟分析。模型选择的参数见表 1。表 1 中的箭头“→”, 表示取值逐渐变化。模拟中, 假设 SARS 潜伏期平均为 7d。

表 1 模拟参数及其分时间段取值(2003 年)

Table 1 Simulation parameters and values varied with time

	3 月 5 日至 4 月 20 日	4 月 20 日至 5 月 1 日	5 月 1 日至 5 月 5 日	5 月 5 日至 5 月 20 日
入院时间(1d)	3.5	3.5→3.0	3.0	3.0→2.5
隔离强度/%	0(无)	0→50	50→70	70→75
社交人数/人	15	15→8	2	6
感染率(7d 内/人)	3.85	→1.33	→0.952	→0.325
SARS 病人接触医务人员的人数/人	10	→5	→3	3
地区外 SARS 输入人数/人	3/5 为 3 人 3/8 为 5 人 3/12 为 1 人 3/15 为 1 人	0	0	0

应用上述参数, 模拟的结果, 见图 2 和图 3。图 2 中曲线 A 表示每天实际感染人数(处于潜伏期), 图 2 中曲线 B 表示每天新发病人数。图 3 中曲线 C 表示累计 SARS 病人数, 图 3 中曲线 D 表示社会上未得到有效控制的 SARS 病人数。在图 2 与图 3 中, 3 月 20 日、4 月 24 日、5 月 1 日、5 月 19 日与 6 月 13 日各参数的模拟值与实际统计值见表 2。

图 2 中 A 曲线表示的模型参数即每天实际感染人数(处于潜伏期), 在现实中是不可观测的, 但 B 曲线表示的每天新发病人数, 是可以统计获得的, 是可观测的, A 曲线比较明显地标示出本模型模拟分析中的时间节点。从图 2 可以知道, 4 月 20 日后北京逐渐采取 SARS 控制措施(见曲线 A), 但是其作用效果有一个滞后期(与 SARS 疾病有潜伏期, 以及到发病后到医院就医的时间相关), 所以, 曲线 B 反应

出,4月20日后未来一周,并未出现新发病例的减少,反而增加,并在5月1日前后,达到高峰期。

从图2中还可以发现,5月1日—5月5日的公共假期政策(期间社会活动大大减少、个人卫生保护增强等),其效应在5月13日左右显现出来,即每天新发病例有一个较快的回落(见图2中B曲线)。5月5日后,虽然社会活动交往逐渐增多,但是,个人防护措施与防护意识,以及对医护人员的保护措施

日益规范与加强,所以,到5月18日左右,每天新发病例又有一个较快的回落(见图2中B曲线)。

观察图3中的累计SARS病人人数曲线C,可以发现:在4月28日前,SARS发病人人数呈指数增长;4月28日—5月13日,是线性增长;5月13日后,是一个稳定的平台期。图3中曲线D显示,4月27日左右社会上未得到有效控制的SARS病人人数达到高峰,是北京最危险的时期。

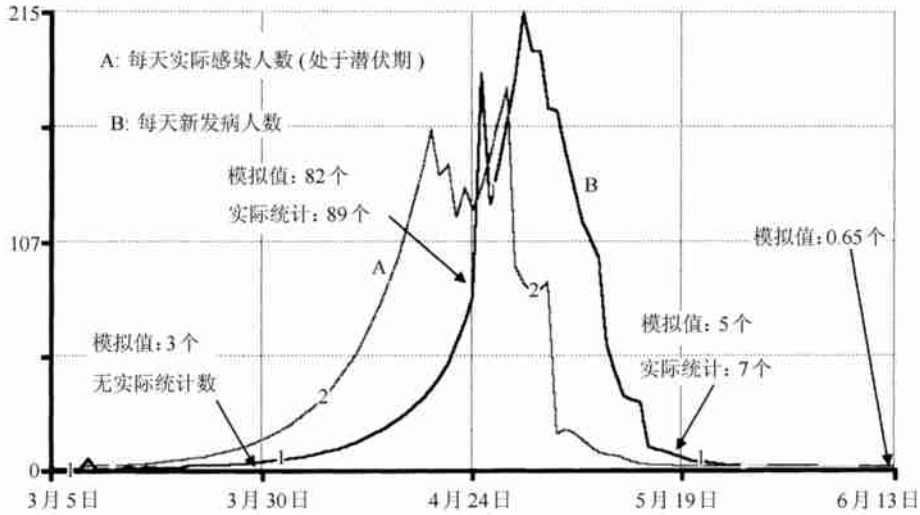


图 2 每天实际感染人数与每天新发病人人数随时间的变化

Fig. 2 Infections number and new symptom onset number per day varied with time

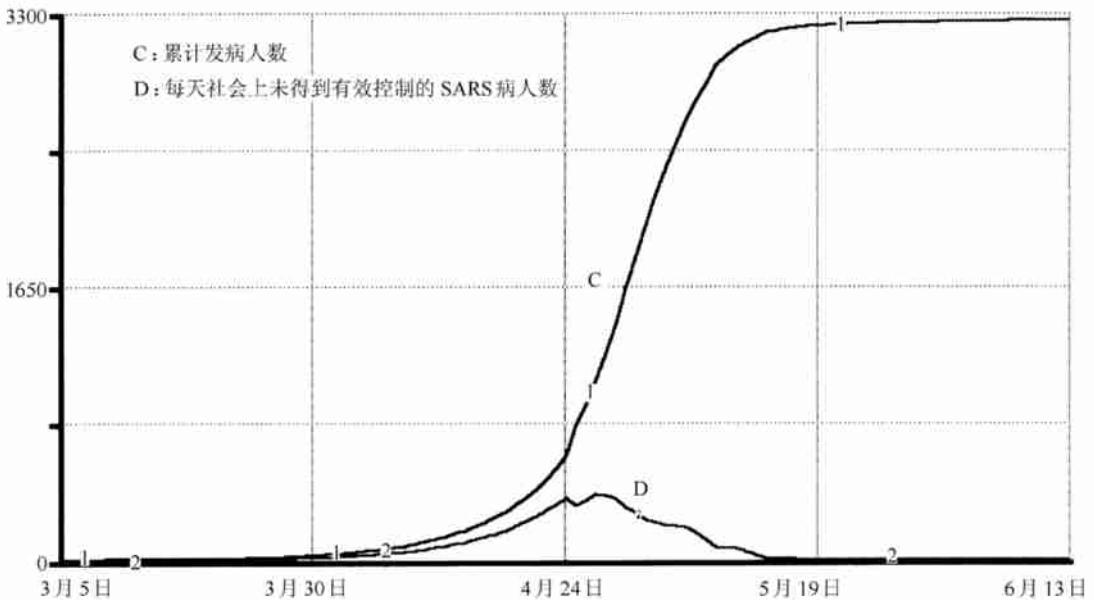


图 3 每天累计发病人人数与社会上未得到有效控制的SARS 病人人数随时间的变化

Fig. 3 Number of accumulated cases and number of free SARS patients uncontrolled in society per day varied with time

表 2 北京 SARS 疫情模拟结果(2003 年)

Table 2 Simulation results of SARS dynamics in Beijing

		03-30	04-24	05-01	05-19	06-13
A 曲线: 每天实际						
感染人数(处于潜伏期)	模拟值	14	122	83	1	0.27
B 曲线: 每天新发						
病人人数	模拟值	3	82	196	5	0.65
	实际统计		89	122	7	
D 曲线: 社会上未						
得到有效控制的 SARS 病人人数	模拟值	18	372	287	5	0.56

从上述计算与模拟分析可知,北京 4 月 20 日以后一段时间内实行的各种控制措施,以及 5 月 1 日—5 月 5 日的长假对于北京 SARS 疫情的控制是非常有效的;而 4 月 27 日左右社会上未得到有效控制的 SARS 病人人数达到高峰,是最危险的时期,但也是北京采取措施、有效控制 SARS 疫情发展的最关键、最重要的时间与机会。

在 5 月 20 日后的平台期,我们对可能的 SARS 控制措施强度的减弱、社会接触人数的增加、地区外 SARS 病例输入人数等参数的变化进行了模拟分析。我们参照表 1 中 5 月 20 日的参数设置,调整部分参数,以观察累计 SARS 病人人数的变化情况。假设隔离强度从 75% 逐渐降为 30%,社交人数从 6 个逐渐变为 15 个,地区外输入 SARS 病例在 5 月底输入 15 个,那么 6 月 13 日累计 SARS 病人人数计算结果是:调整参数后比调整参数前多 51 例。这表明在 SARS 疫情后期,如果外来 SARS 病例输入增多、内部又放松控制,可能会出现 SARS 疫情一定程度的反弹与波动。

5 结论与讨论

应用系统动力学模型,可以帮助我们定量地分析与理解 SARS 的传播与控制机制。但是,目前模型方法中的问题难点在于缺乏详尽的、反映 SARS 疫情的实际统计数据,以及数据基础上的模型参数的具体取值。本文的模型计算与分析研究,主要依

据关于北京市的 SARS 疫情通告的数据与媒体公开发表的相关资料。由于缺少详细的流行病学调查资料,我们主要通过设定某些参数以及参数的取值变化,研究不同阶段时间内、不同控制措施与强度条件下,SARS 疫情的变化情景,从而评价措施效果,支持决策。进一步的研究工作包括:与有关部门合作,获取流行病学调查资料,并与流行病学专家密切合作,更加合理地设计动力学模型结构与模型调控参数,以及估计并设定比较符合实际的参数取值,从而完善动力学模型以及模拟结果;同时,开展 SARS 传播与控制特征、规律在不同地域上的差异性研究,总结 SARS 传播与控制的典型地域性模式,从而为 SARS 的防疫与控制,提供基于不同地域环境(自然环境与社会环境)条件下的多种经验与模式方法。

参考文献 (References)

- [1] "SARS Information Visualization" website, 2003, <http://www.sarsmap.cn>. [“SARS 信息可视化”网站, 2003, www.sarsmap.cn.]
- [2] Analysis Center of Statistical Data in Beijing Normal University, 2003, <http://math.bnu.edu.cn/~chj>. [北京师范大学统计数据分析中心, 2003, <http://math.bnu.edu.cn/~chj>.]
- [3] Donnelly, C A, *et al.* Epidemiological Determinants of Spread of Causal Agent of Severe Acute Respiratory Syndrome in Hong Kong, Published Online May 7, 2003, <http://image.thelancet.com/extras/03art4453web.pdf>
- [4] Lipsitch, M, *et al.* Transmission Dynamics and control of Severe Acute Respiratory Syndrome, [www.sciencexpress.org/23 May 2003/Page 1/10. 1126/science. 1086616](http://www.sciencexpress.org/23%20May%202003/Page%201/10.1126/science.1086616)
- [5] Riley, S, *et al.* Transmission Dynamics of the Etiological Agent of SARS in Hong Kong: Impact of Public Health Interventions, [www.sciencexpress.org/23 May 2003 / Page 4/ 10. 1126/science. 1086478](http://www.sciencexpress.org/23%20May%202003/Page%204/10.1126/science.1086478)
- [6] Dye, C, Cay N. Modeling the SARS Epidemic, [www.sciencexpress.org/23 May 2003 /Page 1/ 10. 1126/ science. 1086925](http://www.sciencexpress.org/23%20May%202003/Page%201/10.1126/science.1086925)
- [7] Jia Ren-an, Ding Rong-hua, System Dynamics: Complex Analysis of Reflective Dynamics [M]. Beijing: High Education Press, 2002. [贾仁安, 丁荣华. 系统动力学—反馈动态性复杂分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.]
- [8] Xu Jian-hua. Mathematical Methods in Modern Geography [M]. Beijing High Education Press, 1994. [徐建华. 现代地理学中的数学方法[M] 北京: 高等教育出版社 1994.]

Simulation and Analysis of Control of Severe Acute Respiratory Syndrome

GONG Jian-hua¹, SUN Zhan-li², LI Xiao-wen¹, CAO Chun-xiang¹, LI Xiao-ying¹, QIAN Zhen-guo¹, ZHOU Jie-ping¹

(1. *Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*

2. *Department of Urban and Regional Planning, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA*)

Abstract: A Severe Acute Respiratory Syndrome (SARS) spread model based on System Dynamics (SD) approach is implemented to do the quantitative analysis of the critical importance of control policies such as early report, early quarantine, and early hospitalization to control further SARS epidemic spread. Using this model, a case study on Beijing SARS epidemic situation is conducted. The simulation results show that the onset-to-hospitalization interval and effective quarantine are two key factors in SARS transmission. Furthermore, the shortening of onset-to-hospitalization interval should be given the highest priority. In addition, a period based simulation is carried out to analyze SARS spread and control effectiveness in Beijing. The simulation outcome demonstrates that various control measures after April 20, 2003 in Beijing and the public holidays starting from May 1st to May 5th have a significant impact on containing the epidemic situation. The most dangerous days, around April 27, when the number of uncontrolled SARS patients in the society reached at its peak, can also be calculated. The SARS infectiousness number newly reported in Beijing has been at a low level since May 20. But simulation experiments describe that it may fluctuate with import of SARS infectiousness from outside Beijing, weakening of quarantine, more social activities, and so on.

Key words: SARS; system dynamics models; simulation; control measures