

## · SARS 传播动力学模型 ·

【编者按】 本期集中发表了用数学模型方法模拟 SARS 流行、评价干预措施对流行过程影响的 4 篇(其中 1 篇为综述)文章。传染病的流行除了生物学因素外,还受社会因素的影响。用数学模型解释疾病流行现象,前提是应对疾病的流行规律有充分的认识。SARS 是一种新发传染病,人们对其流行规律尚不完全清楚,因此,用简单的数学模型来模拟其流行过程,且模拟的结果也未经过拟合优度检验,其局限性是显然的。我国过去在理论流行病学方面的工作比较薄弱。为了鼓励“百花齐放、百家争鸣”,经编委会讨论,决定刊登这 4 篇文章,希望能够引起争鸣,欢迎读者各抒己见。

## 定量评价 SARS 干预措施效果的传播动力学模型

蔡全才 姜庆五 徐勤丰 程翔 郭强 孙庆文 赵根明

【摘要】 目的 建立一种可以用于严重急性呼吸综合征(SARS)干预措施效果定量评价的传播动力学模型。方法 根据 SARS 流行规律,以传染病 SEIR 流行模型为基础,增设病例管理人群和控制措施相关参数,从而建立起 SARS 的传播动力学模型。以北京市 2003 年 SARS 流行为实例,说明所建模型在干预措施效果定量评价上的应用。结果 所建立的模型可以随时调整干预措施相关参数。通过干预情景假定,可以模拟各种干预措施情况下 SARS 的流行过程,从而对干预措施效果做出定量评价。实例研究发现,该模型可以较好地模拟北京市 2003 年 SARS 流行过程;北京市 2003 年 4 月 20 日前后采取的措施对 SARS 疫情控制起到了关键性的作用。结论 所建立的 SARS 流行模型是可靠和稳定的,可以用于 SARS 干预措施效果的定量评价。

【关键词】 严重急性呼吸综合征; 流行模型; 干预措施; 效果评价

To develop a model on severe acute respiratory syndrome epidemics to quantitatively evaluate the effectiveness of intervention measures CAI Quan-cai\*, JIANG Qing-wu, XU Qin-feng, CHENG Xiang, GUO Qiang, SUN Qing-wen, ZHAO Gen-ming. \*Department of Epidemiology, School of Public Health, Fudan University, Shanghai 200032, China

Corresponding author: JIANG Qing-wu, Email: qwjiang@shmu.edu.cn

【Abstract】 Objective To build an epidemic model of severe acute respiratory syndrome(SARS) to be used to quantitatively evaluate the effectiveness of intervention measures. Methods Following the nature of SARS epidemics, an epidemic model of SARS based on SEIR model of infectious disease was built, in which case management group was set up and some parameters related to control measures were included. As an example, data gathered from Beijing was fitted to illustrate its application to quantitatively evaluate the intervention measures. Results In the newly developed model of epidemics, parameters related to control measures could easily be modified. When scenario assumption was used, a model on SARS outbreak under various circumstances of intervention measures could be set. Thus, quantitative evaluation of intervention measures could perfectly be carried out. Pilot study revealed that the fitness existed in modeling the outbreak of SARS in Beijing and the intervention measures implemented around April 20, 2003, had major contribution to the control of SARS. Conclusion The model of SARS epidemics seemed to be stable and reliable to be used to evaluate the effectiveness of intervention measures implemented during the SARS outbreak in a quantitative way.

【Key words】 Severe acute respiratory syndrome; Epidemic model; Intervention measures; Evaluation of effectiveness

基金项目:教育部防治“非典”科技攻关课题资助项目(No. 10);上海市科委“非典”防治专项科研基金(NK2003-002)

作者单位:200032 上海,复旦大学公共卫生学院流行病学教研室(蔡全才、姜庆五、赵根明),管理学院统计学系(徐勤丰);第二军医大学教学教研室(程翔、孙庆文),训练部(郭强)

通讯作者:姜庆五, Email: qwjiang@shmu.edu.cn



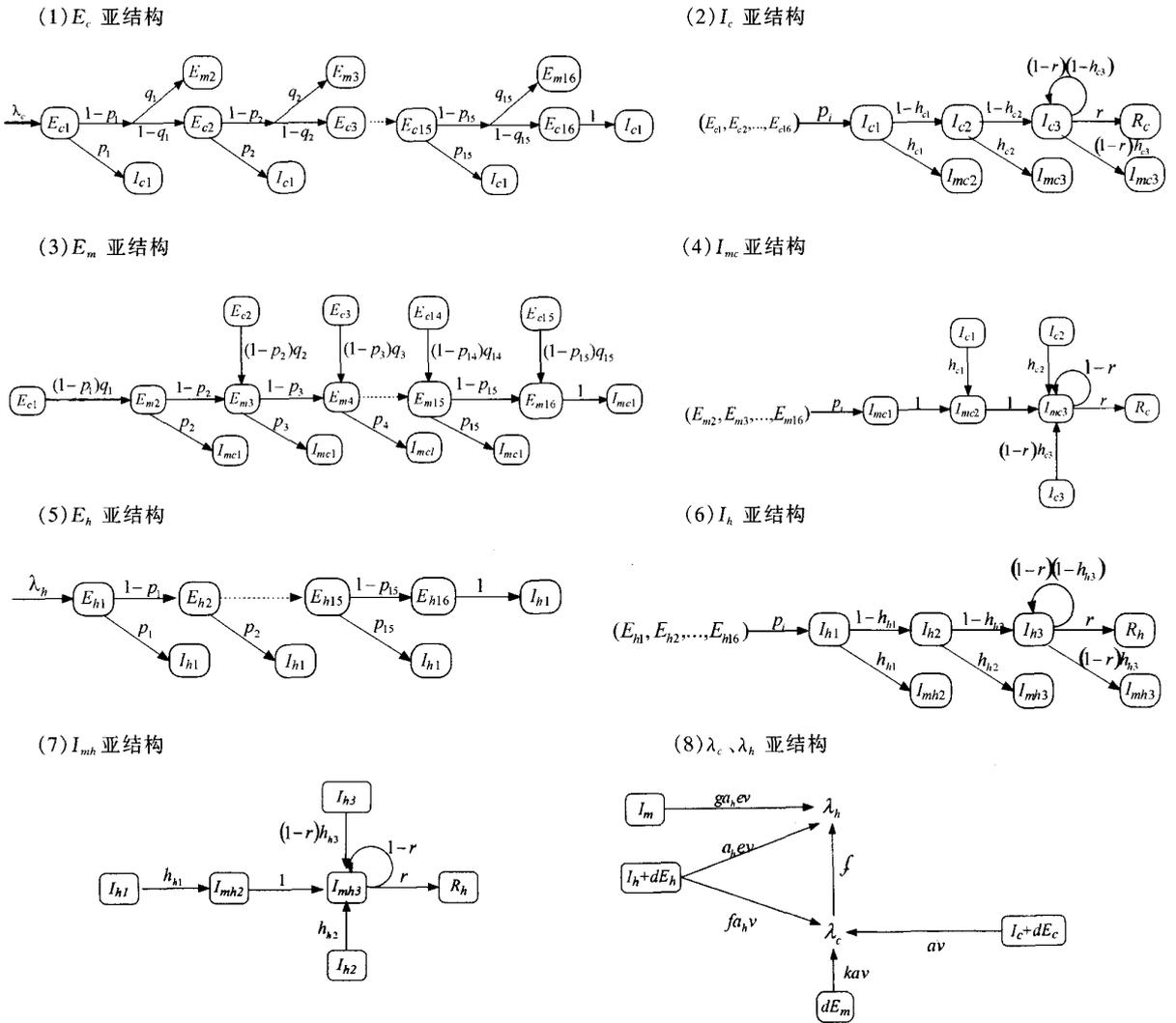


图2 SARS传播动力学模型的亚结构

式中括号内的  $t, t+1$  分别表示流行的第  $t$  天和第  $t+1$  天。  $a$  是基础接触率, 也就是在流行开始时无干预措施的情况下社区人群中平均每人每天与 1 例患者发生近距离接触的概率。在整个流行过程中, 假定  $a$  的取值是一样的, 流行期间有效接触率的变化通过易感人群变化和有关控制措施参数变化来进行调节和模拟。  $v_p$  是背景病原体的基础感染效率, 即流行开始时无干预措施的情况下近距离接触背景病原体成为有效感染(感染成功)的概率。  $N_c$  是社区人群的总人口数,  $S_c(t)$  是  $t$  时刻社区人群中的易感者人数, 所以  $S_c(t)/N$  表示的是  $t$  时刻社区人群中易感者所占的比例。故  $\lambda_{cp}(t+1)$  表示的就是在  $t+1$  时刻社区人群中每人每天与  $I_{cp}(t)$  个背景病原体感染病例中任何一个有效接触并获得有效感

染的概率。

(2) 转阳率  $b$ : 是由  $E_{cp}$  向  $I_{cp}$  转移或  $E_{hp}$  向  $I_{hp}$  转移的速率, 是指背景病原体感染的潜伏期者每天向发病者转移的概率。社区人群和医院人群的  $b$  值是一样的。

(3) 恢复率  $r_p$ : 是由  $I_{cp}$  向  $R_{cp}$  转移或  $I_{hp}$  向  $R_{hp}$  转移的速率。

(4) 免疫丧失率  $r_s$ : 是由  $R_{cp}$  向  $S_c$  转移或  $R_{hp}$  向  $S_h$  转移的速率。

(5) 接种率  $\lambda_c$ : 是由  $S_c$  向  $E_c$  转移的速率。其含义与  $\lambda_{cp}$  类似, 是指社区人群中平均每人每天受到 SARS 冠状病毒有效感染的概率。其组成因子:

$$\lambda_c(t+1) = \{av[I_c(t) + dE_c(t)] + f'av[I_h(t) + dE_h(t)] + k'avdE_m(t)\} S_c(t)/N_c$$

式中,  $a$  是基础接触率;  $v$  是 SARS 的基础感染效率, 即流行开始时无干预措施的情况下近距离接触 SARS 病例成为有效感染(感染成功)的概率。其他参数  $d$ 、 $f'$ 、 $k'$  将在模型参数部分进行具体定义。

(6) 接种率  $\lambda_{hp}$ : 含义与  $\lambda_{cp}$  类似。用于表示医院人群中每人每天受到背景病原体有效感染的概率。其公式:

$$\lambda_{hp}(t+1) = f' a_h v_p I_{hp}(t) S_h(t) / N_h$$

式中  $N_h$  是医院人群的总人口数,  $S_h(t)$  是  $t$  时刻医院人群中的易感者人数, 所以  $S_h(t) / N_h$  表示的是  $t$  时刻医院人群中易感者所占的比例。  $a_h$  是医院人群的基础接触率, 也就是在流行开始时无干预措施的情况下医院人群中平均每人每天与 1 例患者发生近距离接触的概率。同参数  $a$  一样, 在整个流行过程中, 假定  $a_h$  的取值是一样的。流行期间有效接触率的变化也通过易感人群变化和有关控制措施参数变化来进行调节和模拟。其他参数的含义同前。

(7) 接种率  $\lambda_h$ : 含义与  $\lambda_c$  类似。用于表示医院人群中平均每人每天受到 SARS-CoV 有效感染的概率。其公式:

$$\lambda_h(t+1) = f' \lambda_c(t+1) + \{ a_h e' v [ I_h(t) + d E_h(t) ] + g' a_h e' v I_m(t) \} S_h(t) / N_h$$

式中  $e'$ 、 $g'$  的含义将在模型参数部分进行具体定义。其他参数的含义同前。

3. 社区未受检疫潜伏期人群  $E_c$  的亚结构: 图 2(1) 显示的是  $E_c$  亚结构。我们有关潜伏期的研究结果发现, 99% 感染病例将在 15.89 天内发病, 因此在模型中假定 SARS 的最长潜伏期为 16 天。在  $E_c$  亚结构中, 包括后面将要提到的其他人群潜伏期亚结构, 均把潜伏期状态分为 16 个阶段, 每一个阶段的时间长度为 1 天。也就是说,  $E_{c1}$  代表潜伏期第 1 天,  $E_{c2}$  代表潜伏期第 2 天, 其他以此类推。  $p_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 16$ ) 是潜伏期第  $i$  天发病的概率, 潜伏期第 16 天发病的概率  $p_{16} = 1$ 。  $q_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 15$ ) 是潜伏期第  $i$  天被检疫的概率。  $E_{ci}$  向  $E_{c(i+1)}$  ( $i = 1, 2, \dots, 15$ ) 转移的速率为  $(1 - p_i)(1 - q_i)$ ,  $E_{ci}$  向  $E_{m(i+1)}$  ( $i = 1, 2, \dots, 15$ ) 转移的速率为  $(1 - p_i)q_i$ 。

4. 社区未受隔离治疗的症期病例  $I_c$  的亚结构: 图 2(2) 显示的是  $I_c$  的亚结构。假设 SARS 的平均病程不少于 3 天。为了探讨早期隔离治疗对疾病流行的影响, 把症期  $I$  人为地分为三个阶段。其中前两个阶段每个阶段的时间长度为 1 天, 也就是

说,  $I_{c1}$  代表病程第 1 天的病例数,  $I_{c2}$  代表病程第 2 天的病例数。第三阶段  $I_3$  代表各人群中病程  $\geq 3$  天的病例数。  $h_{ci}$  ( $i = 1, 2, 3$ ) 代表病程第  $i$  天被隔离治疗的概率, 也就是入院率。  $I_{c1}$  到  $I_{c2}$  转移的速率为  $1 - h_{c1}$ ,  $I_{c2}$  到  $I_{c3}$  转移的速率为  $1 - h_{c2}$ ,  $I_{c3}$  向  $R_c$  转移的速率为  $r$ ,  $I_{c3}$  向  $I_{m3}$  转移的速率为  $(1 - r)h_{c3}$ 。  $r$  为病程  $\geq 3$  天的恢复率。

5. 社区受检疫潜伏期人群  $E_m$  的亚结构: 图 2(3) 显示的是  $E_m$  的亚结构。与  $E_c$  类似, 也把  $E_m$  状态分为 16 个阶段。由于  $E_m$  状态是由  $E_c$  状态转移而来的, 因此假设  $E_{m1}$  是不存在的。  $E_{mi}$  向  $E_{m(i+1)}$  ( $i = 2, 3, \dots, 15$ ) 转移的概率为  $(1 - p_i)$ 。

6. 社区人群发病后受隔离治疗的症期病例  $I_{mc}$  的亚结构: 图 2(4) 显示的是  $I_{mc}$  的亚结构。与  $I_c$  类似,  $I_{mc}$  也分为三个阶段。  $I_{mc1}$  向  $I_{mc2}$ 、 $I_{mc2}$  向  $I_{mc3}$  转移的概率均为 100%。  $I_{mc3}$  向  $R_c$  转移的概率为  $r$ 。

7.  $E_h$ 、 $I_h$ 、 $I_{mh}$ 、 $\lambda_c$ 、 $\lambda_h$  亚结构: 在接诊 SARS 的工作中, 医务人员每天都有可能会接触到 SARS 病例, 实际上无法对他们进行检疫, 所以在模型中不考虑医务人员受检疫的问题。医院人群潜伏期者  $E_h$  的亚结构见图 2(5)。  $E_{hi}$  向  $E_{h(i+1)}$  ( $i = 1, 2, \dots, 15$ ) 转移的概率为  $(1 - p_i)$ 。医院人群发病后未受隔离治疗的症期病例  $I_h$  的亚结构见图 2(6)。转移概率与  $I_c$  类似。医院人群发病后受隔离治疗的症期病例  $I_{mh}$  的亚结构见图 2(7)。我们假设不存在  $I_{mh1}$ , 所以实际上  $I_{mh}$  只有两个阶段。其转移概率类似于  $I_{mc}$ 。  $\lambda_c$ 、 $\lambda_h$  的亚结构见图 2(8)。

8. 模型参数定义: 模型描述中所涉及到的参数可以分为 4 类。其中, 上标带有“'”的取值均可随时间变化而发生改变。

(1) 背景感染参数: 指与背景感染相关的参数  $a$ 、 $a_h$ 、 $v_p$ 、 $b$ 、 $r_p$ 、 $r_s$ , 这些参数的取值范围均为 0:1。参数的具体含义已在前面详述。

(2) SARS-CoV 特征参数: 指主要由 SARS-CoV 本身决定的参数, 在整个流行过程中不发生变化。包括: ① 潜伏期相关参数: 即潜伏期第  $i$  天发病的概率  $p_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 16$ ); ② 病程相关系数  $r$ : 即前面提及的病程  $\geq 3$  天的恢复率; ③ 潜伏期传播系数  $d$ : 用于调节潜伏期的传染性, 假定取值范围为 0:0.1。

(3) 控制措施相关参数: 包括病例管理参数

$(h'_{ci}, h'_{hi}, q'_i)$  和减少传播的相关参数  $(f', g', k', e')$ 。病例管理三类参数的含义已在前面叙述。 $f', g', k', e'$  的取值范围均为 0:1, 在模型中主要用于模拟各种干预措施对流行的影响, 取值越小措施的效果越好。其中,  $f'$  模拟了减少社区人群与医院人群接触的措施效果;  $g'$  模拟了病例隔离措施效果;  $k'$  模拟了检疫措施效果;  $e'$  模拟了院内个人防护以减少感染的措施效果。

(4) 其他参数: 包括接触率  $a, a_h$  和感染效率  $v$ , 具体含义见前面所述。

9. 模型公式: 分社区人群、医院人群、病例管理人群, 对模型中所涉及的状态变量随流行变化的规律进行描述。时间  $t$  的单位均为天, 状态变量之间转移的速率均为每天的转移速率。

(1) 社区人群:

$$\begin{aligned}
 S_c(t+1) &= [1 - \lambda_{cp}(t) - \lambda_c(t)]S_c(t) + r_s R_{cp}(t) \\
 E_{cp}(t+1) &= (1 - b)E_{cp}(t) + \lambda_{cp}(t)S_c(t) \\
 I_{cp}(t+1) &= (1 - r_p)I_{cp}(t) + bE_{cp}(t) \\
 R_{cp}(t+1) &= (1 - r_s)R_{cp}(t) + r_p I_{cp}(t) \\
 E_{ci}(t+1) &= \lambda_c(t)S_c(t) \\
 E_{ci}(t+1) &= (1 - p_{i-1})(1 - q'_{i-1})E_{c(i-1)}(t) \quad (i = 2, 3, \dots, 16) \\
 I_{c1}(t+1) &= \sum_{i=1}^{16} p_i E_{ci}(t) \\
 I_{c2}(t+1) &= (1 - h'_{c1})I_{c1}(t) \\
 I_{c3}(t+1) &= (1 - h'_{c2})I_{c2}(t) + (1 - r)(1 - h'_{c3})I_{c3}(t) \\
 R_c(t+1) &= R_c(t) + r[I_{c3}(t) + I_{mc3}(t)] \\
 \lambda_{cp}(t+1) &= av_p I_{cp}(t)S_c(t)/N_c \\
 \lambda_c(t+1) &= \{av[I_c(t) + dE_c(t)] + f'a_h v [I_h(t) + dE_h(t)] + k' av d E_m(t)\} S_c(t)/N_c
 \end{aligned}$$

(2) 医院人群:

$$\begin{aligned}
 S_h(t+1) &= [1 - \lambda_{hp}(t) - \lambda_h(t)]S_h(t) + r_i R_{hp}(t) \\
 E_{hp}(t+1) &= (1 - b)E_{hp}(t) + \lambda_{hp}(t)S_h(t) \\
 I_{hp}(t+1) &= (1 - r_p)I_{hp}(t) + bE_{hp}(t) \\
 R_{hp}(t+1) &= (1 - r_i)R_{hp}(t) + r_p I_{hp}(t) \\
 E_{h1}(t+1) &= \lambda_h(t)S_h(t) \\
 E_{hi}(t+1) &= (1 - p_{i-1})E_{h(i-1)}(t) \quad (i = 2, 3, \dots, 16) \\
 I_{h1}(t+1) &= \sum_{i=1}^{16} p_i E_{hi}(t) \\
 I_{h2}(t+1) &= (1 - h'_{h1})I_{h1}(t) \\
 I_{h3}(t+1) &= (1 - h'_{h2})I_{h2}(t) + (1 - r)(1 - h'_{h3})I_{h3}(t) \\
 R_h(t+1) &= R_h(t) + r[I_{h3}(t) + I_{mh3}(t)] \\
 \lambda_{hp}(t+1) &= f'a_h v_p I_{hp}(t)S_h(t)/N_h \\
 \lambda_h(t+1) &= f'\lambda_c(t+1)\{a_h e'v [I_h(t) + dE_h(t)] + g'a_h e'v I_m(t)\} S_h(t)/N_h
 \end{aligned}$$

(3) 病例管理人群:

$$\begin{aligned}
 E_{m2}(t+1) &= (1 - p_1)q'_1 E_{c1}(t) \\
 E_{mi}(t+1) &= (1 - p_{i-1})q'_{i-1} E_{c(i-1)}(t) + (1 - p_{i-1})E_{m(i-1)}(t) \quad (i = 3, 4, \dots, 16) \\
 I_{mc1}(t+1) &= \sum_{i=2}^{16} p_i E_{mi}(t) \\
 I_{mc2}(t+1) &= I_{mc1}(t) + h'_{c1} I_{c1}(t) \\
 I_{mc3}(t+1) &= I_{mc2}(t) + h'_{c2} I_{c2}(t) + (1 - r)h'_{c3} I_{c3}(t) + (1 - r)I_{mc3}(t) \\
 I_{mh2}(t+1) &= h'_{h1} I_{h1}(t) \\
 I_{mh3}(t+1) &= I_{mh2}(t) + h'_{h2} I_{h2}(t) + (1 - r)h'_{h3} I_{h3}(t) + (1 - r)I_{mh3}(t)
 \end{aligned}$$

10. 模型应用: 首先, 我们通过模型与实际流行数据拟合来估计模型的各个参数; 然后, 采用 Vanguard DecisionPro 软件建立 SARS 传播动力学模型的 Markov 链模型<sup>[8]</sup>。通过 Markov 链模型, 可以模拟疫情的动态变化, 得到模型各个状态变量的实时模拟值。通过改变模型中干预措施相关参数, 如  $f', g', k', e'$ , 可以模拟干预措施对流行的影响, 从而定量评价干预措施的效果。同时, 通过 Markov 链模型和少量的编程, 还可以方便地计算出每个时刻的总再生数、社区人群再生数和医院人群再生数。再生数又称基本繁殖率, 是指在易感人群中 1 个病例在其整个病程中预期直接传播的新病例数。未采取措施前的平均再生数记为  $R_0$ , 采取措施后  $t$  时刻的再生数称为  $R_t$ 。再生数可以反映疾病流行的趋势, 当再生数  $< 1$  时, 疾病的流行将趋于终止。干预措施的最终目标就是控制再生数在 1 以下。

### 实例分析

SARS 病例资料来自于北京市 2003 年 SARS 个案调查数据库。SARS 病例的诊断标准符合中华人民共和国卫生部《传染性非典型肺炎诊断标准》。北京市 SARS 流行期间主要干预措施资料以及北京市人口资料通过查阅有关文件、研究文献以及咨询有关政府官员获得。拟合北京数据的最佳参数估计部分结果见表 1。模型的初始值设定:  $S_c = 13\ 735\ 000$ ,  $N_c = 13\ 735\ 000$ ,  $S_h = 85\ 000$ ,  $N_h = 85\ 000$ ,  $I_{c1} = 1$ ,  $I_{h1} = 0$ ,  $I_{cp} = 10$ ,  $I_{hp} = 1$ ,  $E_{hp} = 0$ ,  $E_{cp} = 1$ ,  $R_{cp} = 1$ 。模拟时间为 87 天。模拟的输出状态变量为  $I_{c1}$  和  $I_{h1}$ 。模拟值与实际值的显著性检验采用配对  $t$  检验, 在 SPSS 11.5 上实现。结果表明, SEIRP 模型对社区人群和医院人群新发病例数的

模拟效果均较为理想(社区人群:  $t = 0.432$ ,  $df = 76$ ,  $P = 0.667$ ; 医院人群:  $t = 1.942$ ,  $df = 76$ ,  $P = 0.056$ )。流行开始时的总再生数  $R_0$  为 3.95, 在 4 月 20 日之前 ( $t \leq 50$  天) 基本稳定在这个水平。4 月 20 日以后 ( $t > 50$  天), 迅速下降至 1 以下 (估计值为 0.0311)。如果在 4 月 20 日前后不采取强有力的综合性措施, 也就是假定  $t > 50$  天时控制措施相关参数的取值同  $t \leq 50$  天, 在流行第 87 天时累计的临床诊断病例将达到 48 653 例, 第 87 天的新增临床诊断病例将达到 5227 例, 总再生数  $R_{87}$  为 1.44, 流行没有得到有效控制。同样, 可以改变单个参数取值, 以探讨某种干预措施对疫情控制的贡献。

表1 北京市疫区 SEIRP 双流行模型部分参数估计值

模型参数	估 计 值	
	$t \leq 50$	$t > 50$
$a$	4.6e-008	4.6e-008
$a_h$	2.0e-006	2.0e-006
$v_p$	0.5288	0.5288
$b$	0.1519	0.1519
$r_p$	0.06308	0.06308
$r_s$	0.01	0.01
$v$	0.5288	0.5288
$d$	0.01	0.01
$e$	0.99	0.035
$f$	0.1	0.12
$k$	1	0.5
$g$	1	0.4
$q$	0	0.32

讨 论

目前, 有关 SARS 传播动力学研究多数采用的是 SIR 或 SEIR 模型<sup>[2,5,7,9,10]</sup>。用于评价措施效果或拟合实际流行数据时, 往往通过改变接触率和感染效率两个参数的值来实现。由于许多干预措施都会影响到这两个参数的取值, 所以无法分清是哪种或哪些干预措施起了作用, 更不能定量评价其贡献大小。

我们建立的流行模型与现有模型的主要不同之处在于: ①把易感人群区分为医院人群和社区人群, 可以用于探讨医院和医务人员在 SARS 流行中所起的作用, 以及社区人群与医院人群之间的相互作用; ②引入了有关的控制措施相关参数, 可以更精确地模拟干预措施对流行的影响; ③潜伏期、有传染性的

症状期分阶段进行模拟, 分别估计每个阶段的潜伏期发病率和症状期入院率, 可以更精确地模拟流行, 同时还可以探讨早期发现、早期诊断、早期治疗对 SARS 流行的影响; ④专门设立了病例管理人群以模拟检疫和病例隔离措施对疾病控制的贡献。由于所建立的模型可以随时调整干预措施相关参数, 所以, 通过干预情景假定, 可以很容易地模拟出各种干预措施情况下 SARS 的流行过程, 从而对干预措施效果做出定量评价。

实例研究发现, 该模型可以较好地模拟北京市 SARS 流行过程, 而且可以估计各种干预措施对疫情控制的贡献。说明所建立的 SARS 流行模型是可靠的, 可以用于 SARS 干预措施效果的定量评价。

参 考 文 献

- 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: 3215-3221.
- Lipsitch M, Cohen T, Cooper B, et al. Transmission dynamics and control of severe acute respiratory syndrome. Science, 2003, 300: 1966-1968.
- Riley S, Fraser C, Donnelly CA, et al. Transmission dynamics of the etiological agent of SARS in Hong Kong: impact of public health interventions. Science, 2003, 300: 1961-1966.
- Lloyd-Smith JO, Galvani AP, Getz WM. Curtailing transmission of severe acute respiratory syndrome within a community and its hospital. Proc R Soc Lond B, 2003, 270: 1979-1989.
- Ng TW, Turinici G, Danchin A. A double epidemic model for the SARS propagation. BMC Infectious Diseases, 2003, 3: 19.
- Castillo-Chavez C, Castillo-Garsow CW, Yakubu AA. Mathematical models of isolation and quarantine. JAMA, 2003, 290: 2876-2877.
- Choi BCK, Pak AWP. A simple approximate mathematical model to predict the number of severe acute respiratory syndrome cases and deaths. J Epidemiol Community Health, 2003, 57: 831-835.
- Vanguard DecisionPro for Windows 4.0.23 software. (Accessed March 1, 2004, at <http://www.vanguardsw.com/updates/decisionpro40/>)
- 吴开琛, 吴开录, 陈文江, 等. SARS 传播数学模型与流行趋势预测研究. 中国热带医学, 2003, 3: 421-425.
- 李仲来, 崔恒建, 杨华, 等. SARS 预测的 SI 模型和分段 SI 模型. 遥感学报, 2003, 7: 345-349.

(收稿日期: 2004-08-25)

(本文编辑: 张林东)