

文章编号: 1007-4619 (2003) 04-0251-05

# SARS 沿交通线的“飞点”传播模型<sup>\*</sup>

杨华<sup>1</sup>, 李小文<sup>1,2,3</sup>, 施宏<sup>4</sup>, 赵开广<sup>1</sup>, 韩丽娟<sup>1</sup>

(1. 北京师范大学遥感与GIS研究中心, 资源与环境科学系, 北京 100875, 2 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101, 3. Department of Geography and Center for Remote Sensing, Boston University, Boston MA02215 USA, 4. 北京师范大学数学系, 数据统计与分析中心, 北京 100875)

**摘要:** 2003年春SARS在中国部分地区暴发与蔓延, 情况非常危急。全国集中力量对SARS病原学、实验室诊断和临床治疗以及传播模型、应急反应系统等展开研究。综观此次SARS的传播, 除有以往流行性疾病传播的一些共同特点外, 还有一个很明显的特征: 远距离跳跃式传播。这是以往以及目前针对SARS建立的点源扩散模型无法单独解决的。因此提出建立沿交通线的“飞点”传播模型, 以交通工具为一尺度, 建立相对封闭的交通工具内的SARS传播模型, 另以此为基础, 建立沿交通线这一尺度上的有人员流动的空间传播模型, 建立二尺度的“飞点”传播模型, 模拟交通工具内SARS传播的主要影响因子, SARS疫区对非疫区疫情的影响效果, 为SARS防治提供决策支持。

**关键词:** SARS; 交通线; “飞点”; 传播模型

**中图分类号:** TP79/R181.8 **文献标识码:** A

## 1 引言

2003年年初, SARS (Severe Acute Respiratory Syndrome, 传染性非典型肺炎) 即严重急性呼吸道综合症开始在中国大陆及香港、台湾等地区以及其他国家和地区暴发与蔓延。由于此次SARS来势突然而且凶猛, 传染性强, 严重威胁着人民的生命安全, 影响中国的社会稳定与经济发展。从SARS在中国部分地区暴发开始, 政府、科研部门与社会即对此次公共卫生安全事件高度重视, 采取各种措施预防和控制SARS的进一步传播, 截至目前为止, 取得了很好的成效。科研部门更是在政府与社会的支持下, 集中优势力量共同努力对SARS的病原学、实验室诊断和临床治疗、传播模型以及应急反应系统等开展研究, 并取得相当进展<sup>[1]</sup>。

本文的研究工作即是在这种背景下, 早在2003年4月初开展起来的。此时SARS疫情开始传播到北京等华北地区, 而早期SARS流行的广州等华南地区以及香港的疫情处于一个相对稳定的状态。通

过收集相关的数据, 研究有关的SARS传播个案, 传染源追踪, 分析以往流行病传播模型, 发现此次SARS在区域之间的传播有着与以往的流行性疾病一个明显的不同特点: 即存在着远距离跳跃式传播的特点。这种传播的空间分布特性, 是以往的流行病传播模型<sup>[2]</sup>以及此次针对SARS传播建立的点源扩散模型——系统动力学模型<sup>[3]</sup>和回归模型<sup>[4]</sup>无法单独解决的。因此, 本文利用地学中空间分布定量描述的优势, 建立SARS沿交通线的“飞点”传播模型, 在此层次上考虑二尺度: 交通工具内相对封闭环境的点扩散模型以及沿交通线不同站点之间有人员流动的空间传播模型, 此二尺度模型的耦合即为SARS沿交通线的“飞点”传播模型, 通过建立的此模型描述两点之间SARS通过交通线的传播, 模拟SARS疫区对非疫区的影响, 为政府防治SARS提供决策支持。

## 2 交通工具内SARS的传播

SARS沿交通线的“飞点”传播有两个关键环节,

收稿日期: 2003-06-05; 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)和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)资助。

作者简介: 杨华(1971—), 女, 副教授, 1999年毕业于中国地质大学(北京)应用地球物理专业, 现在北京师范大学遥感与GIS研究中心从事定量遥感与GIS基础研究及应用, 已发表文章十余篇。

一个是在相对较长的一段时间内,乘客在交通工具内这个相对封闭的环境中,携带 SARS 病毒的乘客通过与其他乘客的密切接触,将 SARS 传染给其他乘客。此时交通工具内的乘客总数是固定不变的,携带 SARS 病毒的乘客可以认为是一个点传染源,以点扩散的方式向外传播病毒。因此可以借鉴经典的传染病传播模型 SIR 模型<sup>[2]</sup>,针对 SARS 的特性,如潜伏期较长,新被感染的患者在一段时间内(假定一次旅行途中)不会再向外传播病毒感染他人,进行适当的简化。同时,SIR 模型仅仅只考虑传染能力与携带病毒者和健康者人数的乘积成正比,这样过于简单,针对 SARS 传播的特点,影响其传播的参数较多,同时考虑到采取的一些人为控制措施的影响,对其参数化,建立携带病毒者和健康者人数的变化率方程,即交通工具内健康者被感染的概率。

基于 SIR 模型,假设健康者被感染的可能性  $p$  的大小与其处在有携带 SARS 病毒者的交通工具(危险区域)内的时间  $t$  及危险区域内的病毒密度  $\rho$  成正比,即:

$$p \propto t, p \propto \rho \quad (1)$$

同时,相对封闭的交通工具内病毒密度的变化满足如下关系式:

$$\rho = \frac{n_{\text{SARS}}}{V} = \frac{W \times D \times \int_0^t v I dt}{V} = \frac{WDvIt}{V} \quad (2)$$

其中:  $n_{\text{SARS}}$  表示交通工具内经过  $t$  时间后 SARS 病毒的数目,假定由携带 SARS 病毒者以匀速向外释放,即  $dn/dt \propto vI$ , 这里  $v$  表示病毒向外释放的强度,与携带病毒者的发病状况有关,取值可不同;  $I$  表示初始携带 SARS 病毒者的人数;  $V$  为交通工具的体积;  $W$  为通风指标,表示交通工具通风状况,假定按此比例匀速向外排出一些病毒;  $D$  为消毒指标,表示交通工具消毒情况,假定按此比例匀速杀死病毒。由于假定有传播能力的个体在此次旅途中是不变的,不随时间变化,因此,式(2)中的积分可以解析求出。

综合(1)式与(2)式,则有:

$$p = bt^0 = bt \frac{WDvIt}{V} = bWDvI t^2 / V \quad (3)$$

其中,  $b$  为正比例常系数,可由实际数据拟合获得。

设  $t$  时刻健康者人数为  $S(t)$ , 因此,健康者人数随时间的变化率为:

$$\frac{dS}{dt} = -p(t)S(t) = -\frac{bWDvI}{V} t^2 S(t) \quad (4)$$

有:  $dS/S = -\frac{bWDvI}{V} t^2 dt$ , 两边积分得到:

$$\begin{aligned} \ln(S(t)) - \ln(S(0)) &= -\frac{bWDvI}{V} \int_0^t t^2 dt \\ &= -\frac{bWDvI t^3}{V \cdot 3} \end{aligned}$$

其中,  $S(0)$  为初始时刻的健康者人数,有  $S(0) + I = N$ ;  $N$  为交通工具内总的人数。

则有:  $S(t) = S(0) \exp\left[-\frac{bWDvI t^3}{V \cdot 3}\right]$  (5)

因此,本次旅途时间  $T$  内,该交通工具内新被感染的人数  $R(T)$  为

$$\begin{aligned} R(T) &= S(0) - S(T) \\ &= S(0) \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{bWDvI T^3}{V \cdot 3}\right] \right\} \quad (6) \end{aligned}$$

其中,  $W, D$  取值最大为 1, 表示没有通风和消毒, 值越小说明通风和消毒情况越好; 人数、交通工具的体积以及时间均取标准计量单位个、 $\text{m}^3$  和 h。

此模型中的参数可大概分为 3 类, 一类称为病理参数, 如交通工具的体积  $V$ , 载员  $N$ , 运行时间  $T$ , 均可根据实际情况估计; 一类称为病理参数, 如传染能力  $v$ , 正比常系数  $b$ , 需要根据实际的病例数据来拟合和估计或根据病原学的研究结果来估计, 根据目前的数据估计,  $v$  取 10 左右还是合理的,  $b$  取为 0.005 时, 较为合理; 最后一类为人为控制措施的量化参数, 如通风指标  $W$  和消毒指标  $D$ , 是对于实际的一些防治措施的量化评估指标。

该模型表明, 交通工具内 SARS 的传播不仅要考虑当时的通风、消毒等预防措施, 而且还要考虑时间, 并且模型表明传播概率与在交通工具内总的滞留时间的三次方有关。其中通风和消毒情况对交通工具内 SARS 传播的影响已在卫生部公布的交通工具内密切接触者判定标准<sup>[5]</sup> 公告中考虑到了, 但对时间的影响没有考虑得很细致, 该模型的这一结果已通过课题组向中国 CDC 汇报, 得到重视。

### 3 SARS 沿交通线的传播

SARS 沿交通线的“飞点”传播另一个关键环节是由于人口流动的影响, 沿交通线各个站点人员的交换情况不一样, 对站点所在地区 SARS 传播的影响概率也是不一样的。这两个环节也即是两个不同尺度的传播模型, 它们的结合即构成了沿交通线的“飞点”传播模型, 其概念模型介绍见文献[6]“地理空间信息与 SARS 疫情走势”。

前面详细说明了交通工具内 SARS 传播模型,

以此模型为基础,考虑不同站点人员流动的情况,即可建立由于人口流动引起的沿交通线的传播模型。下面以铁路为例,介绍该尺度的模型。由于 SARS 暴发期,人口主要由疫区外流到非疫区,因此该模型目前还没有考虑人口回流的情况,并假设每个站点只有下车的乘客,无上车的乘客。

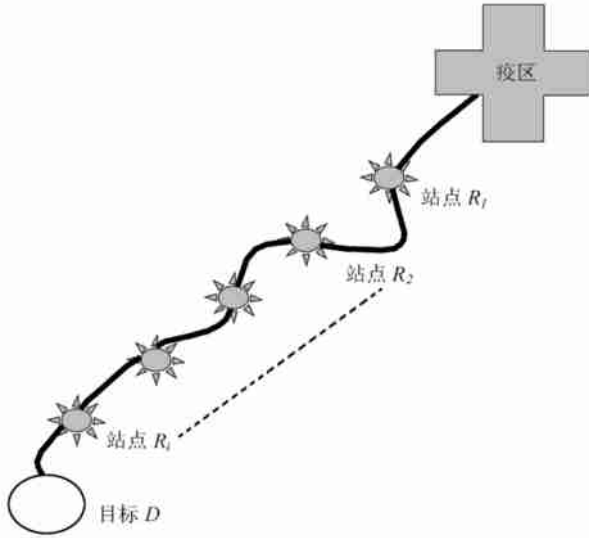


图 1 两点之间交通线的结构图

Fig. 1 Structure of transportation between two points

设两点之间交通线的结构如图 1。疫区  $S$  至  $D_j$  站点( $j=1, \dots, i$ )的行程时间记为  $T_j$ , 每个站点所在地区的外流人口总数分别为  $P_s$  ( $s=1, \dots, i$ )。基于交通工具内的 SARS 传播模型,沿交通线各个站点被感染的下车乘客概率模型可以描述为:

(1) 从  $S$  站  $\rightarrow$   $R_1$  站

根据式(6)可以得到从  $S$  站到  $R_1$  站这段行程内新被感染的人数为:

$$R_1(T_1) = S(0) \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{bWDvI}{3V} T_1^3\right) \right\}$$

假设下车人数以该站点所在地区外流人口总数占全线外流人口总数的比例为比例分配,则  $R_1$  站点下车的人数为:

$$n_1 = \frac{P_1}{\sum_{s=1}^i P_s} \cdot N_0$$

其中,  $N_0$  为初始乘客总人数。下车乘客中,携带病毒者人数为  $I_1^{\text{off}} = \frac{n_1}{N_0} \cdot I$ , 新被感染者人数为  $R_1^{\text{off}} = \frac{n_1}{N_0} \cdot R_1$ 。此时车上乘客的总人数为  $N_1 = N_0 - n_1$ , 携带病毒者人数为  $I_1 = I - I_1^{\text{off}}$ , 新被感染者人数为  $R_1 - R_1^{\text{off}}$ , 健康者人数为  $S(T_1) = N_0 - n_1 - I_1 - R_1 + R_1^{\text{off}}$ 。

(2) 从  $R_1$  站  $\rightarrow$   $R_2$  站

根据式(6)及乘客变化情况,这段行程内新被感染者的人数为:

$$R_2(T_2) = S(T_1) \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{bWDvI}{V} T_2\right) \times \left[ \frac{1}{2} I_0 T_1 T_2^2 - \frac{1}{2} I_0 T_1^3 + \frac{1}{3} I_1 T_2^3 - \frac{1}{3} I_1 T_1^3 \right] \right\}$$

同样根据  $R_2$  站点所在地区的外流人口总数可以得到此站下车的人数为:

$$n_2 = \frac{P_2}{\sum_{s=1}^i P_s} \cdot N_1$$

其中,下车乘客中携带病毒者人数为  $I_2^{\text{off}} = \frac{n_2}{N_1} \cdot I_1$  和新被感染者人数为  $R_2^{\text{off}} = \frac{n_2}{N_1} \cdot R_2$ 。此时车上乘客的总人数为  $N_2 = N_1 - n_2$ , 携带病毒者人数为  $I_2 = I_1 - I_2^{\text{off}}$ , 新被感染者人数为  $R_1 - R_1^{\text{off}} + R_2 - R_2^{\text{off}}$ , 健康者人数为  $S(T_2) = N_1 - n_2 - I_2 - R_1 + R_1^{\text{off}} - R_2 + R_2^{\text{off}}$ 。

同理可以得到从  $R_j$  站到  $R_{j+1}$  站不同乘客数目的变化及下车人流中不同乘客的数目,此时车上健康者人数为

$$S(T_j) = N_{j-1} - n_j - I_j - \sum_{i=1}^j (R_i - \frac{n_i}{N_{i-1}} \cdot R_i)$$

此过程模型即为由于人口流动引起的沿交通线不同站点 SARS 传播模型。该模型表明,沿交通线的“飞点”传播模型以交通工具内的点源扩散模型为基础,与外流人口沿交通线的分布有关,对各站点所在地区的疫情有很大的影响。

## 4 模拟结果

### 4.1 交通工具内 SARS 传播数值模拟

以火车车厢为例,根据实际情况,常规参数的取值为:  $V=100, S(0)=200$ ; 根据卫生部 2003 年第 11 号公告<sup>[5]</sup>,“非典”时期,一般的交通工具都采取了一定的消毒措施,取  $D=0.2$ 。根据实际 SARS 疫情以及针对乘客采取的一些体温监控措施,取  $I=1$ 。模拟行程时间为 1—15h 之内,不同的通风状况:  $W=0.2, 0.5, 0.7$  下, SARS 传播情况如图 2。模拟结果说明长时间行程的交通工具内危险系数还是相当大,但有效的预防措施,如消毒和通风等对减少感染也是显著的。

考虑到此次 SARS 沿交通线“飞点”传播的特点,目前对乘客均采取了一定的体温监控措施,如对

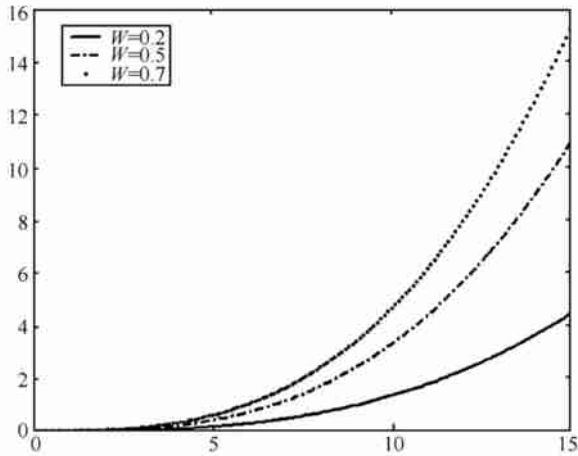


图 2 不同通风情况下 SARS 传播模拟结果

Fig. 2 Results of SARS spreading in different venting

体温  $38^{\circ}\text{C}$  以上的乘客杜绝进入火车, 而对体温介于  $37.5^{\circ}\text{C}$ — $38^{\circ}\text{C}$  之间的乘客不做限制。模拟采取和不采取这种措施两种情况下 SARS 传播的危险度。结果表明: 采取措施能有效地减少 SARS 的传播。以 K48 次空调列车(广州—上海)为例, 根据一份北京地区铁路 20d 内(4 月 30 日—5 月 17 日)在 106.43 万乘客中检查出患 SARS 者共 9 例的报告, 估计 SARS 感染者日流出的比例为 0.0846 人/万人<sup>[7]</sup>, 此时采取体温监控措施比不采取措施 SARS 传播的概率减少的比例大约为 60%。

该模型中的病理参数  $b$ ,  $v$  的综合作用为乘积效应, 且目前要做到严格的区分也是不容易的, 因此在做模拟时, 可估计一个乘积量  $bv = b \times v$  来代替。由于目前实际交通工具内感染病例数据的缺乏, 我们用具有相似特性的北京中华家园工地 SARS 传播的一组数据<sup>[8]</sup> 估计  $bv$  的值。并利用该参数对北京市 2003-05-26 上午 302 路公交车上一乘客体温过高, 拒绝监测<sup>[9]</sup>, 传播 SARS 的危险性进行了模拟; 对 2003-05-24, 一山西 SARS 疑似患者租用出租车从太原至北京治病<sup>[9]</sup>, 传播 SARS 的危险性进行了模拟; 对 2003-05-20 从广东开往上海的 K48 次空调车上一列车员为 SARS 感染者(后被确诊为上海第 8 例 SARS 患者)<sup>[9]</sup>, 列车内 SARS 传播的危险性进行了模拟。3 个实例的模拟结果表明: 从传播范围, 即一次事件感染人数的角度来看, 长时间行程的列车是最危险的地方, 一旦出现疫情, 需要非常细致考虑; 从感染可能来说, 小空间的交通工具作长途旅行, 感染的可能性也是相当高的; 时间在所有情况中均是至关重要的影响因素, 因此不要在人员密集的

场所长时间逗留。

## 4.2 外流人口沿铁路的 SARS 传播数值模拟

以 K701 次(北京到太原)火车为例, 模拟一趟车沿交通线的传播结果。各站点外流人口数据根据外地来京人员分布及外流总人口确定。其中, 一些站点的数据为基于地理信息系统统计的数据, 有几个站点的数据没有收集到, 为假设值。设发车时初始总人数为 2000 人, 带病毒者为 5 人。则这种情况下, 模拟各个站点下车乘客中新被传染者的概率如图 3。结果表明各站点下车乘客新被传染的概率与外流人口的分布有很大的关系。

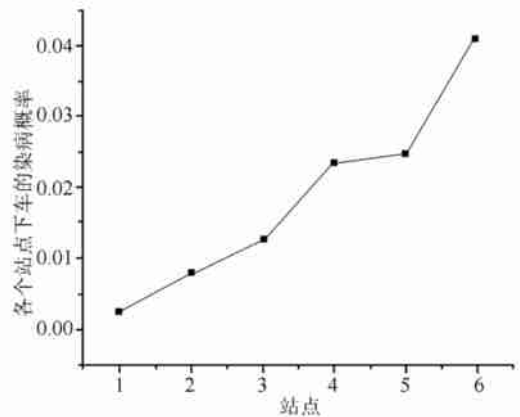


图 3 各站点下车乘客新被传染的概率

Fig. 3 Probability of infected passengers in every stops

以实际沿交通线“飞点”传播的情况为例进行模拟, 选取北京和河北的保定以及石家庄为起始点和目标点。假设乘火车外流到河北省的总人数为 10 万人; 保定市流出人口总数为 1.3 万人, 石家庄为 5.9 万人。火车从北京到保定平均行程时间为 2.5h, 到石家庄为 4h。模拟结果表明, 在短程旅行中, 直达车和过路车的乘客染病概率相差不大。则假设这 10 万人全部乘坐从北京开往石家庄的直达火车。则在这种假设条件下, 乘客染病概率为: 到保定为  $0.84 \times 10^{-4}$ , 到石家庄为  $0.86 \times 10^{-4}$ 。这一模拟结果表明: 保定和石家庄等非疫区疫情的发展受外流人口的影响较大。

## 5 结果与讨论

本文针对 SARS 传播的空间分布特点, 提出沿交通线的“飞点”传播模型。基于交通工具内相对封闭环境、外流人口的分布以及交通线的结构等, 考虑

SARS 传播的病原学原理以及人为控制因素、流动人口分布状况等,建立“飞点”传播模型。模拟结果表明此模型还是比较适合于此次 SARS 空间传播特点。此模型的一些参数确定,模型模拟效果的验证等均还需要进一步的研究,需要其他领域研究成果和实际数据的支持。

### 参 考 文 献 (References)

- [1] News Column in Website of the Ministry of Science and Technology of China, 2003. [ 中华人民共和国科技部网页新闻栏目, 2003, www. most. gov. cn.]
- [2] Kemack W O, McKendrick A G. A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics[ J] . *Proceedings of the Royal Society of London , Series A*, 1927, **115**( 772): 700—721.
- [3] The Institute of Remote Sensing Application, Systematical dynamics Supported the Decision-making to Prevent and Cure SARS[ N] . *Science Times*, 2003-05-09. [ 中国科学院遥感应用研究所. 系统动力学支持非典防治决策[ N] . 科学时报社, 2003-05-09.]
- [4] Statistical Data Analysis Center, Beijing Normal University, 2003. [ 北

京师范大学数据统计与分析中心, 2003, <http://math.bnu.edu.cn/~dhj>.]

- [ 5] The Ministry of Sanitation of China, Announcement Decision Criterion and Treatment Principles for Whom Closely Contact with SARS Sufferers (tentative), The 11th, 2003, [ 传染性非典型肺炎密切接触者判定标准和处理原则(试行). 2003, 第 11 号]
- [ 6] Cao Chun-xiang, Li Xiao-wen, Yan Jun *et al.* Geo-Spatial Information and Spread Trend of SARS[ J] . *Journal of Remote Sensing*. 2003, 7( 4) [ 曹春香, 李小文, 闫 等. 地理空间信息与 SARS 疫情走势[ J] . 遥感学报, 2003, 7(4)]
- [ 7] Newspaper of Amusement Information in Beijing, 2003, May 20. [ 北京娱乐信报, 2003-05-20. <http://tech.scol.com.cn/kjnews/20030520/200352094519.htm>.]
- [ 8] Statistical Information Center, United Work Group of Beijing for SARS Prevention and Cure. Report of Special Subject Survey for Beijing SARS Epidemic Situation, 2003, May. [ 北京防治非典型肺炎联合工作组统计信息中心. 北京非典疫情专题调查报告[ R] . 2003-05]
- [ 9] Website of sina. [ 新浪网, <http://www.sina.com>.]

## “Fly Dots” Spreading Model of SARS along Transportation

YANG Hua<sup>1</sup>, LI Xiao-wen<sup>1,2,3</sup>, SHI Hong<sup>4</sup>, ZHAO Kai-guang<sup>1</sup>, HAN Li-juan<sup>1</sup>

(1. *The Research Center for Remote Sensing and GIS, Dept. Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875 China;*

2. *The Institute of Remote Sensing Application, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101 China;*

3. *Department of Geography and Center for Remote Sensing, Boston University, Boston MA02215 USA;*

4. *Statistical Data Analysis Center, Dept. Math, Beijing Normal University, Beijing 100875 China)*

**Abstract:** In the beginning of this year, SARS( Severe Acute Respiratory Syndrome) broke out and spread in mainland of China, Hong Kong, Taiwan and other countries, regions successively. The world, especially China, pays high attentions on this public hygiene safety affair and takes various measures to prevent and control the further spreading of SARS. This work began in early April in this background. At this time, the SARS began to spread to Beijing and northern regions of China, but the situation in southern regions, such as Guangdong and Hong Kong is relative stable. The data about SARS spreading, special cases and sources in these regions are available. Through these information, we found the spreading characteristic of SARS has a distinct one besides other common ones, namely, jumped spread between two points in long distance. This characteristic can not be singly described by the diffusion models for point sources. Pointed to this, a “fly dots” spreading model along transportation is put forward in this paper, which takes the vehicle as a scale and sets up SARS spreading model in the relative sealed vehicle. Based on this model, in a scale of the transportation, the spatial spreading of SARS due to flow of passengers is modeled. We simulate the danger probability of SARS spreading, three cases reported in internet, and the affect of Beijing SARS epidemic situation to in Hebei province due to flow of passengers. The results show that this model meets the spacial spreading characteristic of SARS. Not only the vent, and disinfect and others measures affect SARS spreading in vehicle, but time is also an important factor to be considered. The SARS spread along transportation is affected by these regions’ population distribution, the SARS epidemic situation in the beginner affect the situation in the regions of the stops in a great degree. The results simulated by the models can be used to support the decision-making

**Key words:** SARS; transportation; “fly dots”; spreading model