

基于蒙特卡罗模拟法的北京地区 非典时空变化特征

宗跃光, 王 莉, 曲秀丽

(南京大学城市与资源学系, 南京 210093)

摘要: 采用专门研究不确定性变化规律的蒙特卡罗 (Monte Carlo) 模拟法结合 GIS, 研究北京地区非典时空变化的基本特征。北京非典时间变化的影响度指数结果表明, 海淀区 (10 66667)、朝阳区 (6 69231)、东城区 (5 97436)、西城区 (4 17949) 和通州区 (3 64103) 等 5 个地区占北京地区非典影响率的 72.8%, 其中海淀区就占了 25%, 远郊区县的影响几乎为零。非典整体频数/次数特征曲线表现出明显的偏正态分布, 因此前期及时对公众预警并切断传染途径是预防体系的首要环节。非典空间分布表现出明显的圈层结构, 并且具有西北—东南走向, 因此非典的空间防御体系应该沿核心区向外设立几道防御圈层。

关键词: 北京地区; 非典; 时空变化规律; 蒙特卡罗模拟法

中图分类号: P188; O242.2 **文章编号:** 1000-0585(2004)06-0815-10

1 引言

人类社会进入 21 世纪以来, 威胁整个人类的某些全球性疾病有蔓延的趋势, 例如非典、禽流感、疯牛病、艾滋病等等, 其中 2003 年的非典 (SARS) 给中国和世界人民造成一场空前的灾难。截止到 2003 年 7 月 11 日, 全世界范围 30 多个国家中累计感染人数 8437 人, 死亡 813 人, 直接和间接经济损失可能达到数百亿美元^[1,2]。世界卫生组织 (WHO) 已经把非典列为 21 世纪初的头号传染病^[3], 并于 2003 年 6 月 17 日在马来西亚召开共同对抗非典的全球卫生组织大会^[4]。美国哈佛大学公共健康学院的 Berry R. Bloom 教授在《科学》杂志上发表的“来自非典的教训”一文提出^[5], 迫切需要解决公众关心的 4 大问题: (1) 非典到底有多严重? (2) 非典会继续在多伦多、新加坡或中国流行吗? (3) 它以什么样的速度和距离进行传播? (4) 全球社会能否有效预防和阻止非典的再次爆发? Brundland 博士指出, 现在是把教训变为行动的时候, 也许我们的时间并不多, 但是我们必须明智地利用它^[6]。Riley 等人根据香港地区收集到的 10 周资料, 得出非典传播的 Gamma 型分布模型^[7]; Lipsitch 等人通过收集到的 6 个月资料, 建立非典传染动力模型, 得出非典二次感染的 Weibull 分布模型的规律^[8]。这两项首次对非典传染规律的研究都是在稿件投出的短短 20 天内在《科学》杂志上发表, 并很快通过网络传播到世界各地。WHO 的专家高度评价他们富有成效的工作, 同时指出由于模型太复杂和数据缺乏, 有许多问题还有待进一步研究, 例如: 在应用层次如何早期发现病人, 在概念层次如何掌握非典各种传播模式? 如

收稿日期: 2004-04-15; 修订日期: 2004-07-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40171029, 40471058); 南京大学科研基金资助项目 (0209004103)

作者简介: 宗跃光 (1952-), 男, 北京人, 城市生态经济学博士, 教授, 博导。1997 年美国哈佛大学客座教授。主要从事城市地理、城市生态、城市景观规划及房地产估价与市场分析。在国内、国际有关学术刊物上发表论文多篇。E-mail: zongyg@126.com

何掌握非典在季节上、空间上的随机分布规律等等^[9]。本文在上述研究基础上,就 Bloom 教授提出的第三个问题^[9],以北京地区为例,从方法论的角度,对非典时空变化随机分布模式的某一个侧面进行深入探讨。

非典作为突发性流行病的最大特点是快速性、变化性和不确定性。非典爆发初期呈现多种快速变化特征,给研究它的时空变化规律造成很大困难;变化性反映出非典的时空变化都很活跃,很多时候在时间上和空间上呈现不规则跳跃式的发展;不确定性是有时我们不能确切知道它的发生时间和具体地点,突然产生或突然消失的概率时有发生。图 1 是根据北京地区的资料^①,采用等时间间隔抽样和自然分类法得到的新增非典空间分布图,可以看到上述 3 个特点体现得十分突出。

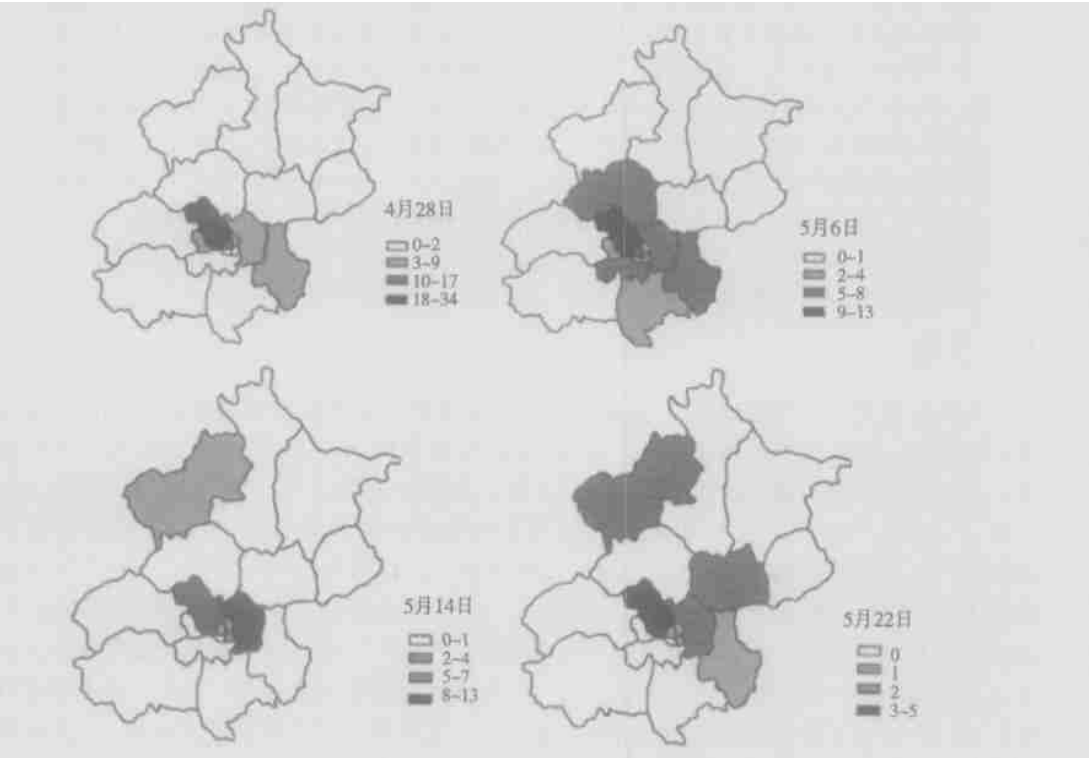


图 1 采用等时间间隔抽样和自然分类法得到的新增非典空间分布图 (个/日)

Fig. 1 Spatial distributions of new cases of SARS based on isometric-distance timing samples and natural classification

Bloom 教授同时指出,控制非典最关键的措施之一就是切断它的传播途径^[9]。但是带有快速变化性和不确定性的非典时空变化到底具有什么总体特征?有无规律可循?如何才能为今后快速建立与之相适应的预警、预防体系提供决策支持?这些问题是本文探讨的重点。显然,传统的分析方法和工作手段已经不能适应非典时空变化规律的研究,但是如果不能掌握好这种规律,我们也无从建立适当的预警、预防体系。因此本文采用专门研究这种不确定性变化规律的蒙特卡罗 (Monte Carlo) 模拟法,结合地理信息系统 (GIS) 对非典时

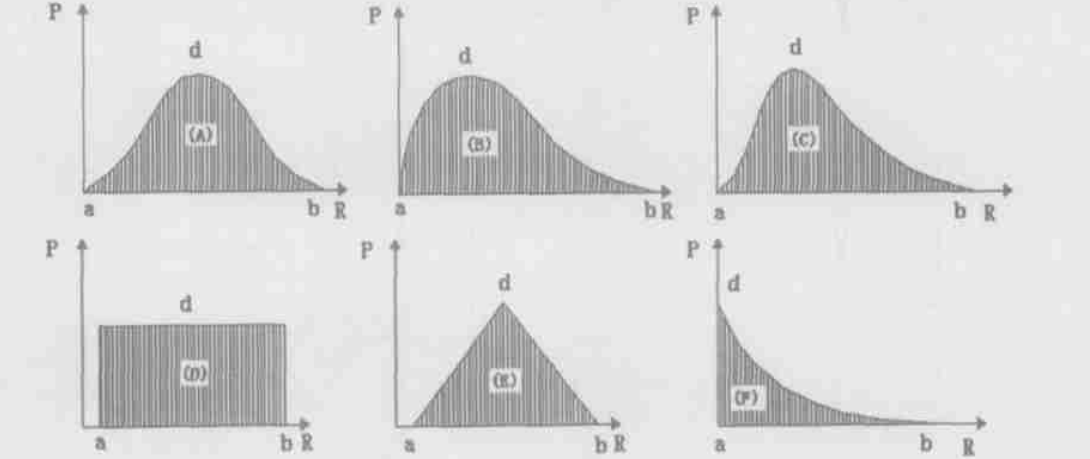
① 详细资料见附录。北京各区县非典发生案例 (2003 年 4 月 27 日—6 月 5 日)。(根据 www.beijing.gov.cn and www.sina.com)

空变化随机特征进行分析。

2 蒙特卡罗模拟法的基本概念与应用

首先我们认识到：(1) 非典的时空变化规律是一个典型的准结构决策问题，因为这里存在许多不确定性，根据原始数据可以看到它的时空变化有时是跳跃性的；(2) 这种不确定性是由多种因素的变动造成的，例如：感染源的数量和分布，感染途径，易感染人群的分布特点，人口密度，空气质量，气象、气候条件，交通网络的分布和交通流密度，防治措施和预警体系等等都会影响非典的时空变化。如何处理这种复杂多变的不确定性，还需要进一步作大量的工作。但是在一定条件下，有经验的决策者可以对未来一定时期判断出：(1) 非典变动的范围，例如非典的未来可能会在目前水平的 4%与 8%之间变化，可能发生在哪个地区或方位；(2) 非典今后变动的趋势，例如升高、降低、先升后降、先降后升等等。决策者面临的困难是，当确定了影响非典多种因素的变动范围和变动趋势后，如何对这种复杂的情况进行综合判断，并且得到客观与合理的解释，以便为科学的决策提供依据？Monte Carlo 模拟法正是针对解决这种困难设计的^[10~14]。对于不确定性问题的研究，当前开发出比较完善的软件有 Decision Engineering 公司的 Crystal Ball 4.0c 和 Vanguard Software 公司开发的 Monte Carlo Simulation with DecisionPro 软件等^[12]。

Monte Carlo 模拟法最早出现于 20 世纪 70 年代，用于医学统计分析^[10]，80 年代引起计算机和工程学科的高度重视^[13]，由于计算机软硬件的限制，直到 90 年代才得以广泛应用到自然和人文科学的各个领域^[14]。Monte Carlo 模拟法研究不确定性问题的基本原理是建立在概率密度函数 (probability density function) 的基础上，概率密度函数用于描述一种变量出现可能性的大小。因为对于不确定性的变量而言，决策者只能比较客观地确定出变量变化的范围和形态，而不是单一的数值。因此可以用一定数值范围内的密度函数值作为输入变量取代单一的数值输入，计算机通过数千次随机的科学迭代模拟过程，综合得出最



(A 正态分布型; B Beta 型; C 对数正态分布型; D. 均一型; E 三角形; F 指数衰减型;
a、b 是函数的变化范围, d 是最大频数值, X 坐标轴 R 为变量变动值域 Y 坐标轴 P 为变量出现概率大小)

图 2 Monte Carlo 模拟法常用的概率密度函数

Fig 2 Some common distribution functions in the Monte Carlo simulation

科学的输出模式。这种方法的最大优点是把专家积累的经验和观测到的有限数据有机结合，从而减少单纯主观经验判断或单纯依靠不完整的数据带来的决策误差。

Monte Carlo 模拟法应用的基本前提是：要求决策者根据各种影响非典变动的数据，确定影响因素变动的范围极其概率密度函数，然后计算机通过设计好的程序得到输出结果。为此，Monte Carlo 模拟法提供了一系列可供决策者选择的概率密度函数直观图形。如果决策者确定不出某一因素的概率密度函数，计算机软件可以根据历史数据自行选择最佳概率密度函数图形。常用的概率密度函数有：正态分布型、对数正态分布型、均一型和三角形，此外还有指数衰减型、用户自定义型等等（图 2）。

3 方法和技术路线

3.1 问题的界定

北京非典时空变化的基础资料是根据首都之窗（www.beijing.gov.cn），新浪网（www.sino.com）的北京地区非典疫情数据综合而成。时间为 2003 年 4 月 27 日到 6 月 5 日，共 40 天。空间为北京 18 个区县，由于没有街道的数据，因此以区县为统计单元。数据属性选择的是对非典时空变化反映最敏感的每天新增非典人数。

3.2 建立决策树

非典数据在时间轴上和空间上的变化，可以看作各种因素作用下，非典感染人数动态变化的轨迹及其分布。根据收集到的数据，本文重点分析北京 18 个区县非典感染人数在时间和空间上的变化特点，这些区县是如何通过不同的密度函数模型作用于北京市非典的时空变化，以及哪些区县对北京市整体非典的时空分布影响最大等等。由此可以运用 DecisionPro 软件构造最直观的决策树如图 3 所示。

3.3 确定密度函数曲线

北京地区非典的整体时空变化规律是由各区县的变化特点决定的，而各区县的变化特

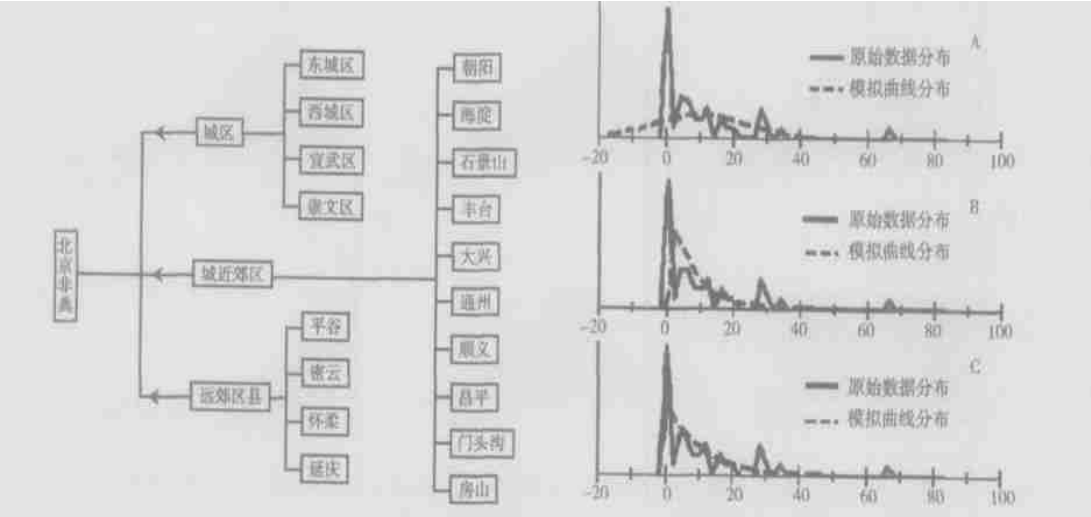


图 3 北京地区非典研究分析的基本决策树

Fig.3 The basic relationship of variables constructed by a decision tree for the study of Beijing's SARS

图 4 对海淀区的非典病例原始数据确定最佳密度函数的过程

Fig.4 Simulation process of best fitting frequency distribution function with original data in Haidian

点又不能用统一的概率函数模式来描述。Monte Carlo 模拟法提供了简单而又便捷的密度函数曲线筛选方法, 即可以由计算机自动生成, 也可以由使用者根据数据结构的实际分布特点进行选择。具体筛选步骤为: (1) 根据各区县的原始数据确定最佳密度函数; (2) 可以用加权或均权的方法确定合并规则; (3) 通过计算机叠代过程得到概率函数的模拟结果和北京非典整体频数/次数变化曲线; (4) 根据 13 种概率函数的最小平均偏差得到北京非典整体最佳模拟方程。Monte Carlo 模拟法的关键步骤是确定各区县的最佳密度函数, 我们采用以下更直观的图形来解释这一步骤。图 4 中的原始数据是海淀区的每日非典发生次数(实线), 虚线是模拟曲线。A 是正态分布曲线, 显然与原始数据差距较大; B 是对数正态分布, 与原始数据有了较好的拟合; C 是指数分布图形, 与原始数据有了更好的模拟效果, 所以被确定为最佳模拟方程。需要注意的是模拟曲线不是为了百分之百地模拟原始数据, 而是对某些明显偏离正常状态的数据进行滤波, 这样更加有利于不确定性问题规律的分析研究。

表 1 是经过筛选的各区县最佳概率函数模式及其部分统计指数。从中可以看到以下特点: (1) 非典感染人数变化数量较大的地区, 如海淀、东城、朝阳等区, 最佳概率函数模式是指数分布; (2) 非典感染人数变化数量中等的地区, 如丰台、昌平等表现为对数正态分布; (3) 非典感染人数变化数量很少的地区, 如房山、怀柔等表现为泊松分布; (4) 其他有一些特殊的分布类型, 如石景山区表现为伽玛分布, 门头沟区表现为二项分布等。

表 1 北京各个区县最佳概率函数模式

Tab. 1 The best suitable probability density functions for each district in Beijing							
地区	最佳模拟方程	变化范围 (个)	众数/ 标准差	地区	最佳模拟方程	变化范围 (个)	众数/ 标准差
东城区	指数分布	0—22	5.97	通州区	对数正态分布	0—17	3.64/4.65
西城区	指数分布	0—24	4.18/5.67 *	顺义区	泊松分布	0—3	0.36 *
宣武区	指数分布	0—21	2.10	昌平区	对数正态分布	0—20	1.82/3.92 *
崇文区	泊松分布	0—6	1.05	门头沟区	二项分布	0—2	或然值 1e-6 *
朝阳区	指数分布	0—28	6.69 *	房山区	泊松分布	0—3	中值 0.26 *
海淀区	指数分布	0—67	10.67 *	密云	泊松分布	0—1	中值 0.026 *
石景山区	伽玛分布	0—20	2.87 *	怀柔	泊松分布	0—3	中值 0.26 *
丰台区	对数正态分布	0—13	2.79/3.62	延庆	泊松分布	0—4	中值 0.26 *
大兴区	泊松分布	0—7	0.92 *				

注: 表中最佳模型是根据 Monte Carlo 模拟法筛选的, 其中带 * 号的是标准差。平谷区为零, 所以不在表中。

3.4 输出模拟结果

采用上述最佳概率函数的模拟结果如图 5 和图 6 所示。图 5 的各种数值预示各区县对北京非典整体影响度的大小, 从中可以看到, 海淀 (10.66667)、朝阳 (6.69231)、东城 (5.97436)、西城 (4.17949) 和通州 (3.64103) 是对北京市非典影响最大的 5 个区。图 6 是北京非典整体频数/次数变化曲线的偏正态频率分布图, 具有每日非典低发生次数具有高频率发生的特点。在此基础上, 本文进一步采用表 2 中的 13 种模拟模型, 根据最小平均偏差 (8.42) 选择出北京非典整体最佳模拟方程是季节趋势模型 (式 1), 然后利用式 1 得到北京非典新增感染人数的时间变化及其最佳模拟曲线 (图 7)。

$$y=109.83187-3.3154x+18.2404\sin(2\pi/38\times(x+6.85457))$$

(1)

其中: x 为观测数据; y 为模拟数据; $\pi=3.14159$

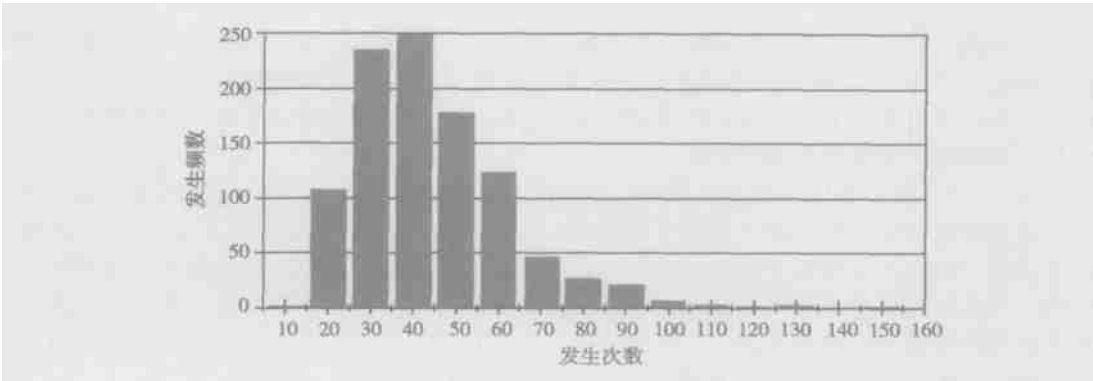


图 6 北京非典频数/ 次数变化曲线表现出来的偏正态频率分布图
Fig. 6 The lognormal curve of Beijing' s SARS frequency changes showing a skew distribution

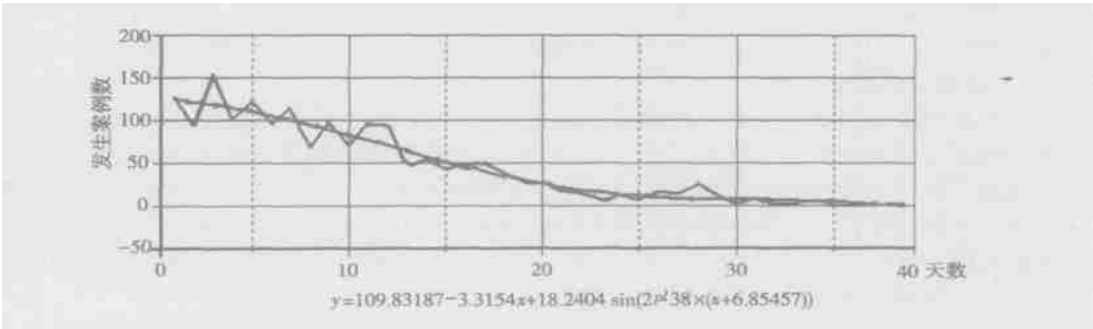


图 7 北京非典新增感染人数的时间变化以及最佳模拟曲线
Fig. 7 The original curve of new cases of SARS in Beijing and the best simulation curve

另一方面，防御措施采取得越早越有效，将会使最大频数及其曲线尽量向左收缩并大幅度减少非典高发次数频率。为了进一步说明这种特点，本文对 4 种可能的情况进行模拟（图 8）：A 是北京市非典实际分布曲线；B 是将海淀区的非典发生水平控制到位于第二位的朝阳区的水平；C 是将前四位区县（海淀、朝阳、东城、西城）的非典发生水平控制到位于中等的崇文区的水平；D 是一种失控的局面，即全市所有区县的非典发生水平都与海淀区相同。从图中可以看到，非典得到有效控制后引起分布曲线的左移（A→B→C），如果失控则会引起曲线的右移（A→D）。因此，前期及时对公众预警并切断传染途径是预防体系的重

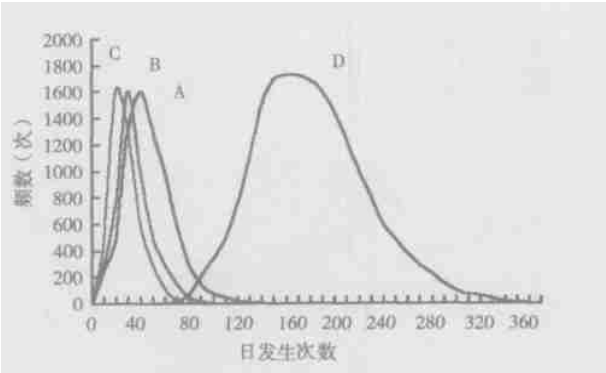


图 8 对非典采取或不采取控制措施的 4 种可能的情况模拟
Fig. 8 4 possible simulations with or without control measures in Beijing

要环节。纵观图 6 整个图形和数据结构, 尽管有一天出现 150 个以上案例的概率, 但是最大频数出现在一天 40 个左右, 说明在非典横行的大多数日子里, 对于拥有上千万人口、卫生防御体系并不十分健全的北京大都市来说并不可怕, 只要坚持把新增发病案例控制在一定水平, 后期逐步消退阶段就会到来。

(2) 北京非典整体时间变化表现出 20 天左右的次级周期性, 这一结果可以从图 7 中北京非典新增感染人数的最佳模拟曲线看出。其中转折点大体对应的是 5 月 16 日, 前期属于快速下降期, 后期属于缓慢消退期。由于我们不具备北京市整个非典发生的全部统计数据, 因此得到的是下降期的规律。但是同样的规律在 Riley 等人香港的非典病人总数观测数据和模拟模型中都有体现^[7], 该曲线从 3 月 5 日、25 日、4 月 15 日到 30 日大体分为 4 个阶段, 符合 20 天的短周期规律 (见附录)。

(3) 北京非典整体时间变化的影响度指数表明(图 5), 城近郊区(29.48718)和城区(13.30769)是对全市非典影响最大的地区, 远郊区县的影响度几乎为零。其中海淀区(10.66667)影响最大, 其次是朝阳区(6.69231)、东城区(5.97436)、西城区(4.17949)和通州区(3.64103), 5 个区占北京地区非典影响率的 72.8%, 其中海淀区就占了 25%。

4.2 非典空间变化特征

根据影响度指数, 可以采用地理信息系统 (GIS) 进一步将其进行空间量化, 得到非典空间分布影响度指数 (图 9), 由于 Monte Carlo 模拟法已经对非典的不确定性进行了科学处理, 因此这种空间量化更加客观地反映了非典在这一时段中的真实状况。北京非典的空间分布特征是: (1) 海淀是非典的核心分布区; (2) 东城、西城、朝阳和通州组成了非典的次级分布区; (3) 宣武、崇文、昌平、石景山、丰台、大兴组成非典空间的外围分布区; (4) 其他区县构成非典的边缘分布区。

上述空间分布特点为我们建立预警、预防体系提供那些决策依据呢? 研究发现:

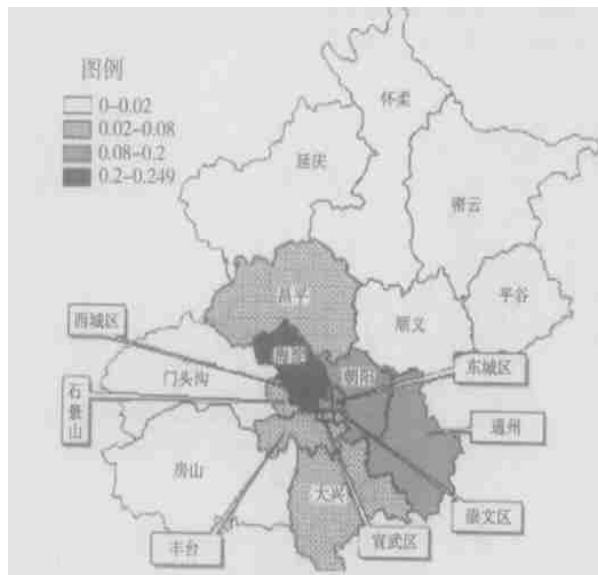


图 9 北京地区非典空间分布影响度指数图
Fig. 9 Spatial distributions of SARS's relative indexes in Beijing area

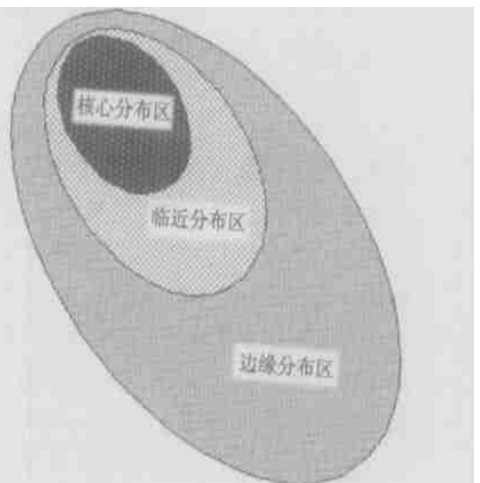


图 10 基于北京地区数据分析得到的非典空间分布理想模式
Fig. 10 Ideal model of SARS's spatial distribution based on the results of analysis in Beijing

(1) 北京非典空间分布表现出明显的圈层分布特征, 并且遵循距离衰减率。这种特点说明在未来建立非典的空间防御体系时, 应该沿核心区向外设立几道圈层防御体系, 以有效阻止非典发病的空间扩散; (2) 非典的核心分布区和外围分布区明显表现为西北—东南走向, 其分布模式 (图 10), 正好和北京地区西北—东南走向的风向、水向相吻合。对此还有待结合气象条件、城市污染等有关资料进一步研究 (见附录)^[15~18]; (3) 非典的边缘分布区影响度较低, 一方面说明郊区县采取了有效的防御措施, 另一方面说明非典最容易在人口稠密的地区大规模爆发。因此需要加强人口稠密地区的集中防范, 同时切断非典向人口稀少地区扩散的途径。

5 结论

北京非典整体频数/次数变化曲线有明显的偏正态分布特征, 反映出低数量的新增患者具有高频率发生的特点。因此, 前期及时对公众预警并切断传染途径是预防体系的首要环节。非典空间分布表现出明显的圈层分布特征, 核心分布区和外围分布区的空间形态表现为西北—东南走向, 正好和北京地区西北—东南走向的风向、水向相吻合。说明非典的空间防御体系应该沿核心区向外设立几道圈层防御体系。

本研究只是阶段性的成果, 由于时间资料的缺乏, 我们没有能模拟出非典变化的整个生命周期, 因此 20 天的次级周期现象还有待进一步验证。由于空间资料的缺乏, 还不能准确判断非典变化的空间分布具体位置及其动态扩散过程, 特别是与北京地区西北—东南走向的风向、水向是否存在一定相关性? 此外, 非典的时空变化与多种因素有关, 对其之间相互作用的关系也需要作深入研究。虽然 GIS 在处理空间数据方面具有强大的功能, 但是对于像非典这种空间数据明显不足, 时间变化比较剧烈的数据属性, 其分析能力显然不够。因此本文尝试采用专门研究不确定性问题的 Monte Carlo 模拟法, 通过对原始数据的前期处理, 从分析方法和基本结论上得到较好的研究效果。

(附录: 北京各区县非典每日发生案例数据资料和有关说明, 读者若需要可发电子邮件向作者索取。E-mail: zongyg@126.com)

致谢: 作者特别感谢首都之窗 (www.beijing.gov.cn) 和新浪网 (www.sino.com) 对非典疫情的及时报道以及美国 Vanguard 软件公司的无私技术支持。同时感谢评审人的充满建设性的修改意见和指正。

参考文献:

- [1] World Health Organization. Severe acute respiratory syndrome (SARS): Status of the outbreak and lessons for the immediate future. 2003, <http://www.who.int/cst/sars>.
- [2] World Health Organization. Cumulative number of reported probable cases of SARS. In: 2003, <http://www.who.int/cst/sars>.
- [3] World Health Organization. Update 83 one hundred days into the outbreak. 2003, <http://www.who.int/cst/sars>.
- [4] World Health Organization. WHO Global Conference on Severe Acute Respiratory Syndrome (SARS). 2003, <http://www.who.int/cst/sars>.
- [5] Bloom B R. Lessons from SARS. Science, 2003, **300**: 701.
- [6] World Health Organization. SARS outbreak contained worldwide. 2003, <http://www.who.int/cst/sars>.

- [7] Riley S, Fraser C, Donnelly C A, *et al.* Transmission dynamics of the etiological agent of SARS in Hong Kong: impact of public health interventions. *Science*, 2003, **300**: 1961 ~ 1966.
- [8] Lipsitch M, Cohen T, Cooper B, *et al.* Transmission dynamics and control of severe acute respiratory syndrome. *Science*, 2003, **300**: 1966 ~ 1970.
- [9] Dye C, Gay N. Modeling the SARS epidemic. *Science*, 2003, **300**: 1884 ~ 1885.
- [10] Hastings W K. Monte Carlo sampling Methods using markov chain and their applications. *Biometrika*, 1970, **57**: 97 ~ 109.
- [11] Patterson D E, Husar R B, Wilson W E, *et al.* Monte Carlo simulation of daily regional sulfur distribution: comparison with SURE data and visibility observations during August 1977. *J Appl Meteor.*, 1981, **20**: 404 ~ 420.
- [12] Kelliber C F, Maboney L S. Using Monte Carlo simulation to improve long-term investment decisions. *The Appraisal Journal*, 2000, **44**: 44 ~ 56.
- [13] Liu J S, Liang F, Wong W H. A theory for dynamic weighting in Monte Carlo computation. *Journal of the American Statistical Association*, 2000, **96**: 554 ~ 561.
- [14] Liang F, Wong W H. Real-parameter evolutionary Monte Carlo with applications to Bayesian mixture models. *Journal of the American Statistical Association*, 2001, **96**: 653 ~ 667.
- [15] 王 铮, 蔡砥, 等. 中国 SARS 流行的季节性风险探讨. *地理研究*, 2003 **22** (5): 541 ~ 550.
- [16] 中国科学网. 中央气象局专家: SARS 传播与气象要素有着密切关系. 2003, www.sciencetimes.com.cn.
- [17] 中央气象局. 气象专家分析非典传播与气象条件. 2003, www.Tq121.com.cn.
- [18] 新华网. 专家提出: 非典的出现与生态环境变化关系密切. 2003, www.tom.com.

Monte-Carlo simulation based approach for the study of SARS' s spatial-temporal scenarios in Beijing

ZONG Yue-guang, WANG Li, QU Xiu-li

(The Department of Urban and Resources, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: This paper improves a technique by using Monte Carlo simulation approach integrated with GIS to study the spatial-temporal uncertainty of SARS in Beijing. The output relative indexes from the sensitive analysis show that five districts, Haidian with the value of 10.66667, Chaoyang with the value of 6.69231, Dongcheng with the value of 5.97436, Xicheng with the value of 4.17949 and Tongzhou with the value of 3.64103, together contributed 72.8% of the total frequency distribution in the case of Beijing' s SARS. However, Haidian District alone presented almost 25% of the total frequency distribution. The frequency distribution of SARS' s series was a typical lognormal distribution. These facts indicated that the early-stage timely warning of SARS and the blocking transmission of infection for the public are of the first importance. The spatial distributions of SARS' s effects significantly presented different shapes of circles. However, the shapes of the circles were most likely a kind of ellipse that had long axis extending from the northwest to the southeast in Beijing. It is suggested that the preventive system of SARS can be served as several circles from the center to the fringe when new outbreaks of SARS occur.

Key words: Beijing area; SARS; spatial-temporal distribution; Monte Carlo simulation