



甲型 H1N1 流感城镇间公路交通传播研究

肖洪^①, 田怀玉^{①*}, 赵暕^②, 张锡兴^③, 李亚品^④, 刘毅^⑤, 刘如春^③, 陈田木^③

① 湖南师范大学资源与环境科学学院, 长沙 410081;

② 北京大学医学部, 北京大学第三医院, 北京 100191;

③ 长沙市疾病预防控制中心, 长沙 410001;

④ 军事医学科学院微生物流行病研究所, 病原微生物安全国家重点实验室, 北京 100071;

⑤ 中国矿业大学机电与信息工程学院, 北京 100083

E-mail: xiaohong.hnnu@gmail.com

2011-01-24 收稿, 2011-05-23 接受

湖南省重点学科建设项目(2008001)、湖南省自然科学基金(11JJ3119)、湖南省高校创新平台开放基金(2011HN001)和湖南省科技计划(2010SK3007)资助项目

摘要 2009 年甲型 H1N1 流感通过公路交通在我国城镇间广泛传播并造成巨大损失, 掌握其传播规律对城市化和减轻疫情造成的损失具有重要意义. 本文以长沙市为研究区, 分析了甲型 H1N1 流感沿公路交通传播的规律及风险因子, 构建了结合扩散速度和人群流动的疫情扩散模型, 模拟甲型 H1N1 流感在长沙市城镇间的传播过程. 结果表明, 公路沿线及道路交叉区域发病率较其他区域高, 高速公路和县道分别在疫情快速发展期和顶峰期对疾病的传播扩散产生重要影响, 长途汽车站在城镇间疫病的传播过程中是重要的风险因子. 模型结合了疫情传播强度预测与流行区域预测, 较其他模型更完整地还原了疫病的时空传播过程.

关键词

甲型 H1N1 流感
公路交通
时空传播
发病率
风险因子

2009 年的甲型 H1N1 流感大流行给中国和世界带来了严重不良影响. 虽然甲型 H1N1 流感的暴发性大流行已经进入尾声, 许多研究对甲型 H1N1 流感防控的经验教训进行了总结^[1~4], 但对于甲型 H1N1 流感在城镇间传播的规律, 以及公路交通系统对该病的扩散作用等问题的认识仍然有限.

甲型 H1N1 流感主要通过直接的身体接触或飞沫传播, 因此随着人口的大规模流动极易造成疫病的传播与扩散, 我国疫情初期表现为输入性病例的传播, 随后是以输入性病例造成的二代病例为主, 后期出现了由大城市向中小城市扩展, 从东部地区向西部地区扩展的趋势^[5]. 这一切都表明, 随着城市化进程加速, 城市与乡镇的交往越发密切, 城乡间人口流动规模与速度逐年上升, 同时乡镇医疗卫生基础薄弱, 人群间传播传染病极有可能通过交通系统殃及我国更大面积的区域与更大数量的人口, 使疫情事态进一步扩大. 自 2003 年严重性呼吸系统综合症(Severe

Acute Respiratory Syndrome, SARS)事件以来, 国内外学者逐渐意识到交通运输系统对人群间传染病快速传播扩散的重要作用, 如 Olsen 等人^[6]发现 SARS 通过潜伏期患者在航空运输中传播并在世界范围内扩散, Fang 等人^[7]的研究表明公路交通网络对 SARS 在我国的大范围扩散具有重要作用, 另外曹春香与 Fang 等人^[8,9]均认为公路交通系统对高致病性禽流感在我国的传播也存在影响, 在针对甲型 H1N1 流感航空传播的研究中 Khan 和常超一等人^[10,11]发现其传播速度惊人, 极易通过航空运输系统在世界各国扩散.

我国具有人口基数大、流动人口多、高危人群数量大等特点^[12], 并且公路交通是我国城镇间客运交通的主要方式, 2008 年全国公路交通共运送旅客 2682114 万人次^[13], 是全国航空客运量的 100 倍以上, 因此我国公路交通沿线及城市站点更容易成为疫病高发区并造成疫病大规模传播扩散, 我们有理由相信对甲型 H1N1 流感城镇间公路交通扩散规律的研究具有

重要的现实意义. 本文以长沙市为研究区, 旨在揭示公路交通对城镇间甲型 H1N1 流感的扩散作用, 分析疫病在城镇间传播的规律以及公路交通中的风险因子, 通过构建疫情扩散模型来模拟疫病沿公路交通扩散的情况, 对其时空传播特征进行探索性的分析与解释. 完整周期病例数据来自长沙市疾病控制预防中心.

1 数据及空间化处理

(i) 研究区流行病学调查. 流行病学调查数据包括年龄、性别、家庭住址、工作住址和出现症状的时间等信息, 长沙市在 2009 年 5 月 22 日发现首例甲型 H1N1 流感病例, 疫情暴发期间 (2009 年 5 月 22 日至 12 月 31 日) 共确诊甲型 H1N1 流感病例 5439 例, 其中男性 3215 例 (占 59%), 女性 2224 例 (占 41%), 男性病例明显多于女性, 二者有显著性差异 ($\chi^2=129.07$, $P<0.01$). 病例平均年龄 (14.0 ± 7.7), 最大 85 岁, 最小不到 1 岁, 其中 92.8% 的病例集中在 0~20 岁年龄段. 从病例的时间分布可以看出 (图 1), 此次长沙市甲型 H1N1 流感疫情发展可分为 4 个阶段, 从 5 月 22 日到 9 月 2 日, 甲型 H1N1 流感在长沙市零星出现; 9 月 3 日到 10 月 24 日, 出现甲型 H1N1 流感流行的小高峰, 但发病人数不多; 从 10 月 25 日开始, 甲型 H1N1 流感病例开始大量出现, 高峰出现在 11 月中旬, 高峰时每天新增病例 200 多例; 11 月 26 日以后新增病例逐步下降.

(ii) 研究数据空间化. 应用长沙市 1:5 万地形图, 经几何校正、投影后逐一矢量化乡镇行政界线, 录入乡镇名称, 建立乡镇尺度地理信息数据库, 包括地理编码、病例信息、人口数据以及公路交通设施数

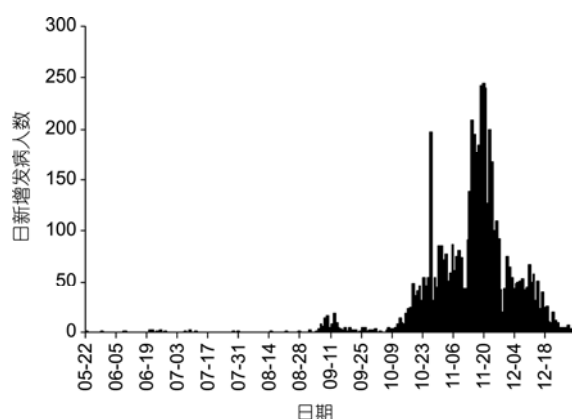


图 1 长沙市甲型 H1N1 流感病例时间分布

据等. 流行病学调查得到的疫情信息为文本形式, 无法用于进一步分析甲型 H1N1 流感沿公路的时空传播特征, 因此研究采用感染者的家庭住址作为甲型 H1N1 流感时空数据的空间信息, 通过 ArcGIS9.2 软件以手工方法对住址信息进行匹配, 构建长沙市甲型 H1N1 流感地理信息数据库, 包括 5392 例甲型 H1N1 流感病例空间信息, 另有 47 例患者地址不详, 空间化率为 $5392/5439\times100\%=99\%$.

2 公路交通对甲型 H1N1 流感的扩散

2008 年长沙市交通系统共运送旅客 13488 万人, 其中公路交通运送旅客 11334 万人, 占运送总量的 84%^[14], 是长沙市城镇间人群流动的主要运输方式. 本文将国道、省道、县道、高速公路以及长途汽车站作为分析对象, 探索甲型 H1N1 流感病例随公路交通在城镇间扩散的过程与规律, 以下分别从沿公路发病率、发病时序和风险因子 3 个角度进行分析.

2.1 长沙市甲型 H1N1 流感的发病率

发病率 (incidence rate, IR) 是指一定时期内新病例的发生频率, 计算方法为观察期间内发生的新病例数/同期平均人口数. 图 2(a) 是 2008 年底长沙市人口密度和病例空间分布情况, 乡镇区县的人口数据主要根据 2005 年的 9‰ 人口调查数据 (精确到乡、镇、街道) 和 2009 年长沙市统计年鉴公布的人口数据^[14] (精确到区、县) 估计得到, 估计方法为^[15]

$$\text{PopDen}'_{2008} = \left(\frac{\text{Pop}'_{2005}}{\text{Pop}_{2005}} \times \text{Pop}_{2008} \right) / \text{Area}', \quad (1)$$

其中, PopDen'_{2008} 表示 2008 年底各乡、镇的人口密度, Pop_{2008} 是 2008 年底各区、县的人口数量, Pop'_{2005} 和 Pop_{2005} 分别代表 2005 年底乡、镇、街道的人口数量和区、县的人口数量, Area' 为乡、镇的行政面积.

图 2(b) 是采用核心密度估值 (kernel density estimation, KDE) 方法计算得到的长沙市甲型 H1N1 流感发病密度情况. 核心密度估值是利用一个移动窗口遍历整个区域, 对窗口内不同位置的空间点进行加权, 计算得到的加权平均值代表窗口内每个采样点的分布状况, 即空间点的分布密度 (式 2). 核密度函数 $K(u)$ 一般采用正态高斯曲线函数 (式 3), 核密度估值中的核半径对计算结果有很大影响, 半径越小, 反

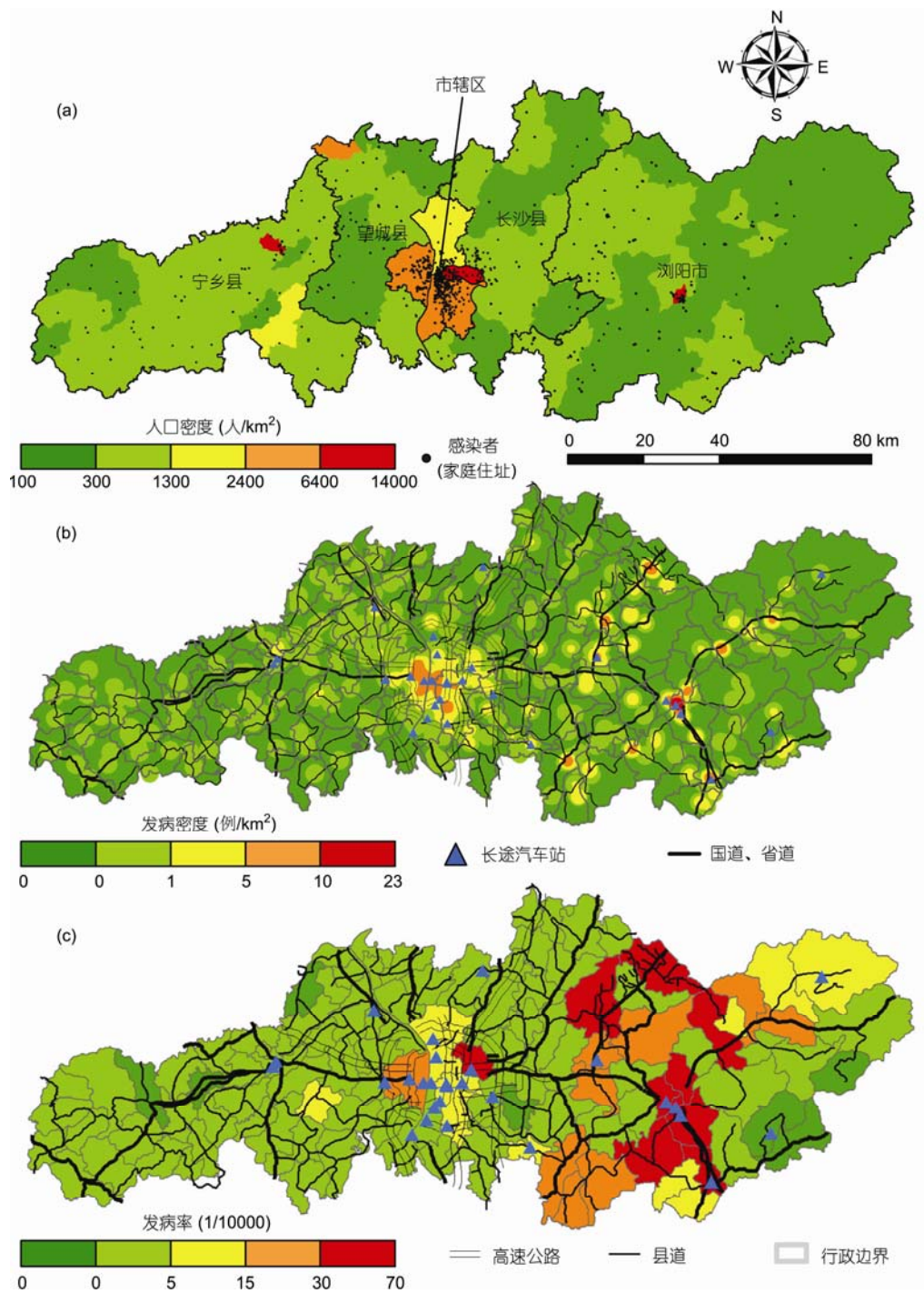


图 2 长沙市甲型 H1N1 流感疫情空间分布
(a) 人口密度、病例分布; (b) 空间发病密度; (c) 发病率图

应的细节越多, 但总体趋势却越发不明显, 反之则能较好地反应整体趋势. 本文中核半径取 2.5 km, 单元尺度取 1 km², 既可保留足够的细节, 又可以反映出研究区发病人数的整体趋势.

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x-x(i)}{h}\right), \quad (2)$$

$$K(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}u^2\right), \quad (3)$$

式中, K 是核函数, h 表示核半径, x 为待估值的点, $x(i)$ 为以 x 为中心、 h 为半径范围内的点。

图 2(c) 是长沙市甲型 H1N1 流感的发病率图, 市辖区(5 个城区) 甲型 H1N1 流感发病率为 8.70/万, 4 个县分别为浏阳市 22.97/万、长沙县 3.11/万、望城县 2.32/万、宁乡县 1.26/万, 病例多集中于市辖区、县级市以及县城, 局部地区疫情暴发造成较多的发病人数与较高的发病率, 各级公路沿线均有大量病例出现, 并且公路沿线的发病率明显高于其他地区(图 2)。一方面说明公路沿线存在的大量居民点患病风险较大。另一方面也说明公路交通带动的大规模人流对疫病的扩散起到重要的作用, 并且交通线路交叉区域往往是疫病的高风险区, 如国道、省道交叉区域的城镇, 以及省道、县道交叉区域的乡镇较周边区域发病率更高, 我们的研究也表明, 长沙市正处于经典 Clark 分布初期, 大量流动人口向城镇中心、交通便利的区域聚集^[16]。

2.2 疫情传播的时序性

2009 年 5 月 22 日第 1 例甲型 H1N1 流感病例在长沙市芙蓉区出现后, 短短 7 个月的时间里, 共有 46 个街道、30 个乡、80 个镇出现被感染病例, 扩散速度惊人, 对我国医疗卫生资源薄弱的广大乡镇造成了巨大威胁。通过对感染者发病时间和空间位置的统计, 我们还原了本次疫情扩散的时空过程(图 3), 甲型 H1N1 流感首先在人口密集的市辖区传播, 随着 8、9 月份的到来, 开学的学生从各地聚集到学校, 9 月的流行病学调查数据显示, 患者以学生为主, 空间位置集中在校区及周边地区。进入 10 月, “十一”长假引发的大规模人群流动(包括探亲访友、长途旅行等)将疫情进一步扩散。伴随冬季的到来, 低温引发的普通流感将疫情进一步升级, 导致甲型 H1N1 流感在长沙市大面积扩散。

疫病扩散过程中出现以下几个特点: 首先经主

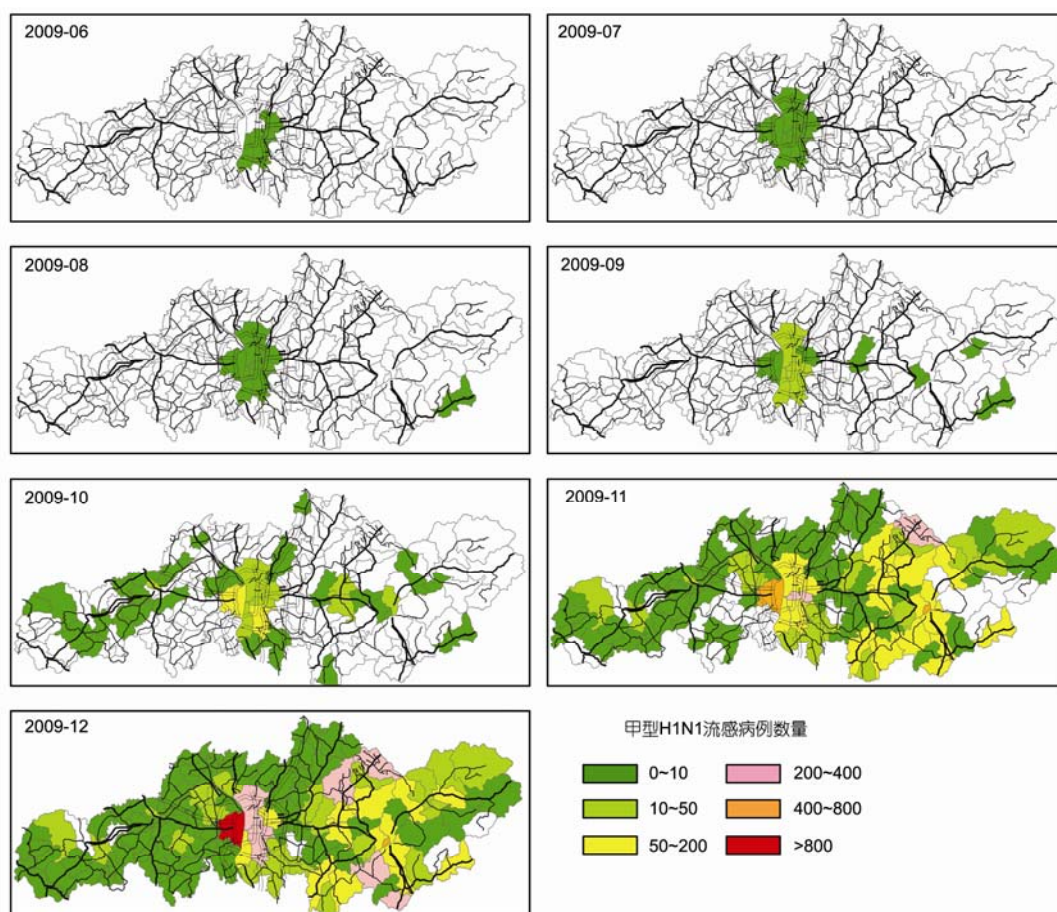


图 3 长沙市甲型 H1N1 流感时空扩散情况

要干道及长途汽车站传播,再通过县道进一步向沿线扩散.另一方面大多由近及远传播,向距离疫区较近的区域传播,再沿公路交通线路向远距离传播.在市辖区出现甲型 H1N1 流感病例后,到市辖区不同距离的县市出现疫情的次序存在差别,距离市辖区较近的县城较郊区更早出现病例且数量更多,如长沙县比距离市辖区较远的浏阳市暴发时间早,并因此造成了发病高峰期的差异,市辖区与浏阳市的发病高峰期相差约 1 个月时间(图 4).

2.3 风险因子分析

甲型 H1N1 流感主要通过飞沫经呼吸道传播,也

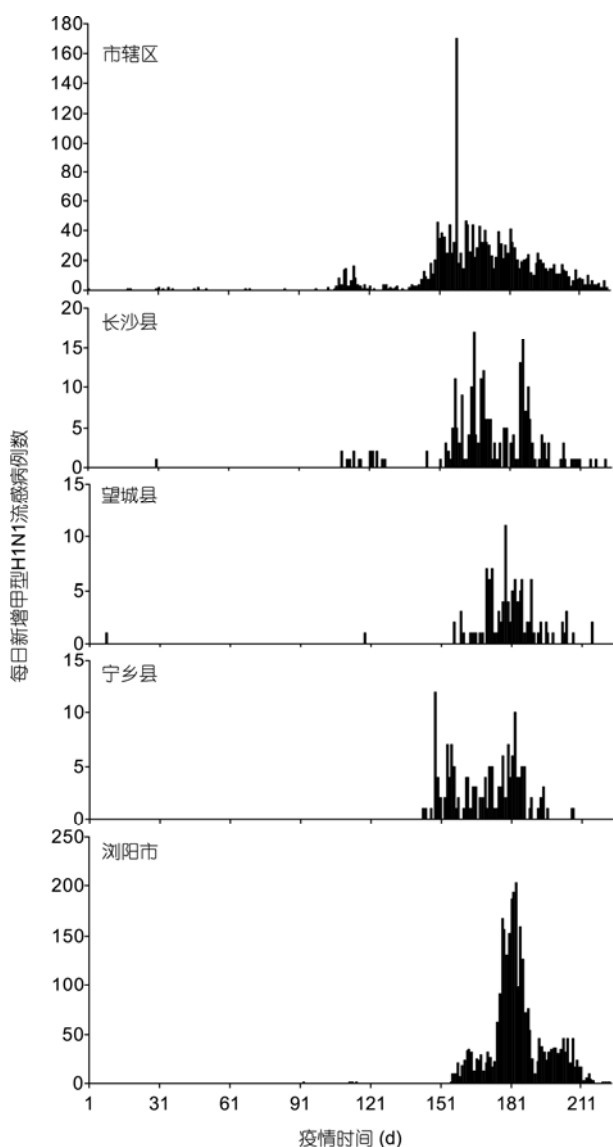


图 4 疫情在长沙市辖区与 4 县(市)的时间分布

可通过口腔、鼻腔、眼等处黏膜直接或间接接触传播,接触患者的呼吸道分泌物、体液和被病毒污染的物品亦可能引起感染,其中飞沫传播距离一般 $<2\text{ m}$ ^[17].基于其传播特征,在相对封闭环境下(交通工具中)近距离的接触可造成病例数量几何速度增长,并且由于潜伏期的存在,甲型 H1N1 流感极易通过城镇公路交通网络造成大面积扩散与暴发.

根据图 1(a)将疫情分为起始期(5.22~9.2)、快速发展期(9.24~10.24)、顶峰期(10.25~11.25)以及下降期(11.26~12.30)等不同阶段,以长沙市 4 个区、30 个乡、84 个镇作为空间分析单元,将各区县乡镇在不同阶段是否发病作为因变量,提取出国道、省道、县道、高速公路是否穿过研究单元以及单元内是否有长途汽车站作为变量,通过逻辑斯蒂回归模型探索国道、省道、县道、高速公路以及长途汽车站等在不同时期对甲型 H1N1 流感传播的影响.计算结果表明,在疫情快速发展期,高速公路与长途汽车站是重要的风险因子,对疫情在区域的传播产生显著影响.在疫情大面积暴发的顶峰期,县道发挥了重要作用,说明疫情进一步向乡镇扩散的过程中主要经由县道.我们还发现,伴随疫病传播扩散始终,长途汽车站均产生显著影响,长途汽车站是连接省内外公路交通的重要枢纽,因而成为疫病传播扩散的高风险场所,是重要的风险因子.

比值比(odds ratio, OR)是病例对照研究中表示疾病与暴露之间关联强度的指标,OR 是指某事物发生的可能性与不发生的可能性之比,若 $OR>1$ 说明疾病的危险度增加,是正关联,若 $OR<1$ 则是负关联.在病例对照研究中 OR 为病例组的暴露比值/对照组的暴露比值.

3 疫情扩散模型

3.1 疫情扩散速度与人群流动

不同传染病的扩散特征往往不同,衡量一种流行病在人群中的传播扩散速度也有多种方法^[18~20],基于前文的发现以及 Cliff 等人^[21]的研究,我们提出了以下城镇间甲型 H1N1 流感扩散速度的测算方法:(i) 用二值化方法表示行政区是否出现病例,而不使用病例数量反映疫情强度;(ii) 2 个行政区之间的距离用穿过行政区中心的公路长度表示;(iii) 疫情的空间扩散顺序是疫情出现区域向邻近的区域传播.

表 1 长沙市公路交通与乡镇区县甲型 H1N1 流感传播扩散的联系

时期与风险因子	一元分析		多元分析	
	Crude OR(95% CI)	P	Adjusted OR(95% CI)	P
起始期				
国道穿过	4.56(1.42~14.61)	<0.01	2.74(0.55~13.58)	0.22
省道穿过	1.13(0.36~3.49)	0.84	3.21(0.52~19.69)	0.21
县道穿过	0.19(0.05~0.76)	0.02	0.62(0.07~5.70)	0.68
高速公路穿过	5.68(1.76~18.32)	<0.01	12.36(2.27~67.34)	<0.01
有无长途汽车站	22.50(5.95~85.15)	<0.01	27.02(5.06~144.39)	<0.01
快速发展期				
国道穿过	2.65(1.06~6.63)	0.04	1.69(0.57~4.97)	0.34
省道穿过	0.58(0.25~1.33)	0.20	0.71(0.25~2.03)	0.53
县道穿过	0.33(0.09~1.15)	0.08	0.37(0.08~1.82)	0.22
高速公路穿过	5.21(2.07~13.07)	<0.01	4.96(1.82~13.51)	<0.01
有无长途汽车站	4.63(1.69~12.72)	<0.01	3.17(1.02~9.78)	0.05
顶峰期				
国道穿过	2.33(0.50~10.96)	0.28	4.10(0.65~25.85)	0.13
省道穿过	1.29(0.44~3.76)	0.65	2.35(0.67~8.24)	0.18
县道穿过	2.38(0.56~10.08)	0.24	7.89(1.15~53.98)	0.04
高速公路穿过	1.53(0.41~5.80)	0.53	1.55(0.38~6.24)	0.54
有无长途汽车站	1.71(0.36~8.15)	0.50	1.94(0.35~10.67)	0.45
下降期				
国道穿过	0.99(0.41~2.40)	0.98	0.63(0.22~1.82)	0.39
省道穿过	0.84(0.40~1.78)	0.65	0.89(0.38~2.08)	0.79
县道穿过	0.76(0.22~2.63)	0.66	1.04(0.22~4.84)	0.79
高速公路穿过	0.99(0.42~2.36)	0.99	0.80(0.31~2.11)	0.66
有无长途汽车站	5.64(1.75~18.17)	0.04	6.71(1.89~23.80)	<0.01

根据流行病学调查数据,统计各地区首发病例时间,时间以月为单位,譬如 6 月 $t=1$,则随后的月份记录为 $t=2, t=3, \dots, t=T$, T 代表从疫情开始到结束经历的月份数,平均扩散速度可以表示为

$$\bar{V} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^T t d_t, \quad (4)$$

式中, N 是出现病例的行政区个数, d_t 表示在 t 月内出现病例的行政区之间的公路距离。

本研究中人口流动以城镇为单位,人口流动目的地分别为长沙市辖区、浏阳市、宁乡县、望城县以及长沙县。由于公路交通系统每天的实际客流量不易统计,我们使用区县(市)迁入、迁出人数^[14]替代,计算方法为使用区县(市)连续 10 年的人口迁入、迁出量拟合 2009 年的人口稳定迁入、迁出量,进而计

算得到疫源地每天稳定的迁出人数 P_A 以及其他区域的迁入人数 P_B 等。

3.2 流行病动态传播

传播动力学模型遵循传染病的一般传染机理,将人群分为易感染者 (Susceptible, S)、感染者 (Infective, I) 和移出者(Removed, R) 3 类^[20],该类模型已被广泛应用于各种传染病的预测并取得了很好的效果^[22,23]。在模型中我们使用疫情传播速度来预测甲型 H1N1 流感通过公路交通在不同时期可能传播到的区域,使用 SIR 模型来反映在疫区感染者的数量变化,因此疫情的时空动态可以表示为

$$\frac{dS}{dt} = -\beta(t) \frac{S(t)I(t)}{N}, \quad (5)$$

$$\frac{dI}{dt} = \beta(t) \frac{S(t)I(t)}{N} - \gamma I(t), \quad (6)$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma I(t), \quad (7)$$

$$\frac{dI_B}{dt} = \frac{\beta(t)S_B(t) \left(I_B(t) + \frac{aI_A \left(t - \frac{d_{AB}}{V} \right) P_B}{P_A} \right)}{N_B} - \gamma I_B(t), \quad (8)$$

式中, t 是时间, $S(t)$ 表示易感者数量, $I(t)$ 为感染者数量, $R(t)$ 为移出者数量, $\beta(t)$ 为感染率, γ 为移出率, $1/\gamma$ 为感染期, 我们假设从疫源地向外流动的感染者占疫源地感染者数量的比例是 α , P_A 是每天从疫源地出发的总人口, P_B 代表每天向 B 地流动的人口。

SIR 模型假设在疫情的不同时期防控措施保持不变, 这显然无法反映感染率随疫情发展及防控措施变化的过程, 为定量刻画长沙市甲型 H1N1 流感疫情发展中防控措施的实际影响过程, 我们参考 Wallinga 等人的研究, 使用似然估计法(likelihood-based estimation)计算不同时间的有效再生率 R_t (effective reproduction number)^[24], 在模型中引入 R_t 来模拟感染率(图 5)。

$$\beta(t) = \frac{R_t N \gamma}{S(t)}, \quad (9)$$

R_t 表示考虑防控措施的影响一个感染者引入易感人群后实际被他感染的第二代平均感染人数, $R_t > 1$ 疾病才可以在人群中传播开来, R_t 越大则疾病传播的速度越快。若 $R_t < 1$, 疾病将在人群中逐渐消亡。 $R_t = 1$ 疾病将在人群中维持现状, 既不会传播开来, 也不会消失。

根据长沙市甲型 H1N1 流感病例流行病学统计

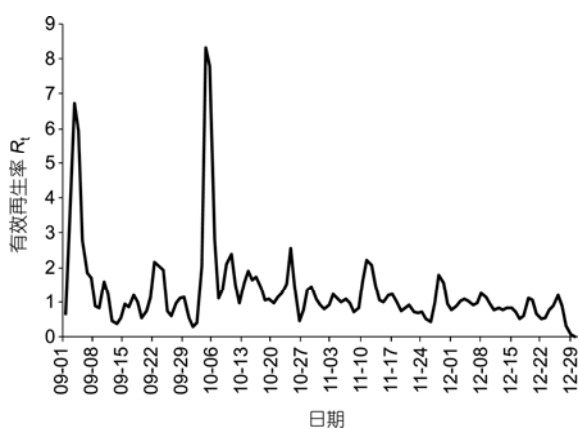


图 5 长沙市 2009 年甲型 H1N1 流感 R_t 变化趋势图

表 2 模拟结果与实际情况

	模拟结果		实际情况	
	累计病例	首例时间	累计病例	首例时间
市辖区	1940		1913	
望城县	599	6 月	115	5 月
浏阳市	1141	10 月	3023	8 月
宁乡县	1118	9 月	155	10 月
长沙县	424	6 月	241	6 月

以及相关病例研究^[1,11,25], 我们设定感染期为 3 d, 病患乘公路交通的概率为 0.15. 模型取得了较好的效果(表 2), 较准确地模拟了疫情在第 1 个疫区市辖区的发展趋势, 对疫病的传播速度进行了准确的模拟, 各个区域出现首例病例的时间误差在两个月以内, 并且距离疫源地越近模拟精度越高。

4 结论和讨论

本文以长沙市为例, 分析甲型 H1N1 流感沿城镇间公路扩散的过程. 结果表明, 各个乡镇的长途汽车站是疫情二次传播的重要疫源地, 公路交叉点区域有较大风险, 公路沿线由近及远扩散疫病, 疫情的不同阶段各级公路的作用和影响存在差异. 由于我国巨大的乡镇人口基数, 激增的城乡流动人口, 以及薄弱的农村医疗卫生资源, 短时间从根本上控制城镇间突发性传染病的传播扩散是困难的. 基于研究结果我们认为, 在城镇间各个长途汽车站重点控制甲型 H1N1 流感及相似传染病的传播是避免疫病大流行的首选, 并且注意防控疫情在国道、省道交叉区域城镇和省道、县道交叉区域乡村的发展, 可以有效地抑制疫病的进一步暴发。

基于地理信息系统的空间信息挖掘不仅能揭示疫情的时空传播特征, 并且可以发现对疫情扩散有重要影响的风险因子, 这是对流行病学传统的“三间分布”分析有效的补充与完善. 在传统 SIR 模型基础上引入疫情扩散速度及人群流动, 解决疫情模拟的时间与空间同步问题, 整合疫情强度与趋势预测. 探索甲型 H1N1 流感随公路交通扩散的风险因子以及扩散速度, 这对人群间传染病的防控具有重要意义。

研究中宁乡县、浏阳市疫情模拟结果与实际情况存在差距, 笔者认为是由以下原因造成的: 首先, 此次长沙市甲型 H1N1 流感感染者职业以学生为主, 学

校人口密度高、活动密集,所以疫病在学校内的感染率会更高,而研究区内不同研究单元的学校数量、学生数量、疫病在学校内的发展等情况均不同,因而造成模型对个别区域发病人数预测效果欠佳。其次,结合图 2~4 我们发现,此次甲型 H1N1 流感的传播在空间上呈现一定的方向性和趋势性,疫病高发区自长沙市中部市辖区逐渐东移,而西部发病人数相对较少,这对模型的预测效果造成了影响。最后,任何一种传染病的发生、发展和传播都是病原体和宿主、病原体和外界环境(自然因素、社会因素)相互作用的结

果,从某些属性层面来看,流行病的扩散也会按照一些属性因素的顺序而传播,例如往往由经济发达地区向经济欠发达地区传播,由人口密度较高的地区向人口密度较低的地区传播,学校暴发的流感向周边社区蔓延,以及收治传染病患者的医院造成二次传播等。因此,如何更全面地考虑感染人群、易感人群的职业构成,引入传染病的传播趋势与方向上的差异,分析对疫病宏观传播有显著作用的其他社会、自然因素,将是完善模型、提高预测精度的关键与下一步工作。

参考文献

- 1 Fraser C, Donnelly C A, Cauchemez S, et al. Pandemic potential of a strain of influenza A (H1N1): Early findings. *Science*, 2009, 324: 1557-1561
- 2 曹志东, 曾大军, 王全意, 等. 北京市甲型 H1N1 早期流行的特征与时空演变模式. *地理学报*, 2010, 65: 361-368
- 3 陆一涵, 居丽雯, 姜庆五. 甲型 H1N1 流行性感冒疫情暴发的思考. *中华预防医学杂志*, 2009, 43: 471-473
- 4 陈继明, 孙映雪, 刘朔, 等. 2009 年新甲型 H1N1 流感病毒的来源和去向分析. *科学通报*, 2009, 54: 1657-1660
- 5 曾光, 张丽杰. 中国如何更好地应对甲型 H1N1 流感大流行. *中华流行病学杂志*, 2009, 30: 653-655
- 6 Olsen S J, Chang H L, Cheung T Y, et al. Transmission of the severe acute respiratory syndrome on aircraft. *N Engl J Med*, 2003, 349: 2416-2422
- 7 Fang L Q, de Vlas S J, Feng D, et al. Geographical spread of SARS in mainland China. *Trop Med Int Health*, 2009, 14(Suppl 1): 14-20
- 8 曹春香, 徐敏, 常超一, 等. 基于元模型的高致病性禽流感传播风险研究. *科学通报*, 2010, 55: 3205-3213
- 9 Fang L Q, de Vlas S J, Liang S, et al. Environmental factors contributing to the spread of H5N1 avian influenza in mainland China. *PLoS One*, 2008, 3: e2268
- 10 Khan K, Arino J, Hu W, et al. Spread of a novel influenza A (H1N1) virus via global airline transportation. *N Engl J Med*, 2009, 361: 212-214
- 11 常超一, 曹春香, 王桥, 等. H1N1 甲型流感全球航空传播与早期预警研究. *科学通报*, 2010, 55: 1128-1133
- 12 曾光. 我国如何应对甲型(H1N1)流感的几个关键问题. *中华流行病学杂志*, 2009, 30: 421-423
- 13 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2009. 616
- 14 长沙市统计局. 长沙统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2009. 399
- 15 曹志冬, 曾大军, 王全意, 等. 2008 年北京市手足口病流行的规律与传播机制. *科学通报*, 2010, 55: 764-772
- 16 肖洪, 田怀玉, 朱佩娟, 等. 基于多智能体的城市人口分布动态模拟与预测. *地理科学进展*, 2010, 29: 347-354
- 17 肖洪, 田怀玉, 赵喆, 等. 应用仿真模型模拟甲型 H1N1 流感的街道社区传播. *中华流行病学杂志*, 2010, 31: 696-699
- 18 Cliff A, Haggett P. Methods for the measurement of epidemic velocity from time-series data. *Int J Epidemiol*, 1982, 11: 82-89
- 19 Trevelyan B, Smallman-Raynor M, Cliff A D. The spatial dynamics of poliomyelitis in the United States: From epidemic emergence to vaccine-induced retreat, 1910-1971. *Ann Assoc Am Geogr*, 2005, 95: 269-293
- 20 肖洪, 田怀玉, 赵喆, 等. 传染病模型分析与预测方法研究进展. *中华流行病学杂志*, 2011, 32: 81-85
- 21 Cliff AD, Haggett P, Smallman-Raynor M. An exploratory method for estimating the changing speed of epidemic waves from historical data. *Int J Epidemiol*, 2008, 37: 106-112
- 22 石耀霖. SARS 传染扩散的动力学随机模型. *科学通报*, 2003, 48: 1373-1377
- 23 汪海英, 荣峰, 柯孚久, 等. 严重急性呼吸综合征(SARS)的传播与控制动力学. *科学通报*, 2003, 48: 1933-1935
- 24 Wallinga J, Teunis P. Different epidemic curves for severe acute respiratory syndrome reveal similar impacts of control measures. *Am J Epidemiol*, 2004, 160: 509-516
- 25 李亚品, 钱全, 方立群, 等. 中国大陆 2009 年早期确诊的 420 例甲型 H1N1 流感病例流行病学特征分析. *中华流行病学杂志*, 2009, 30: 1102-1105