

北京市甲型H1N1流感对气象因子的时空响应

杨斯棋¹, 邢潇月¹, 董卫华², 李帅朋¹, 詹智成¹, 王全意³, 杨鹏³, 张奕³

(1. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875; 2. 北京师范大学遥感科学国家重点实验室, 北京 100875;
3. 北京市疾病预防控制中心, 北京 100013)

摘要: 为研究北京市甲型H1N1流感对气象因子的时空响应规律, 本文结合地理探测器及空间自相关分析方法, 分析北京市甲型H1N1流感的时空分布情况, 基于地理加权回归(GWR)模型, 建立北京市甲型H1N1流感与平均风速、降雨量、平均湿度以及平均温度之间的回归模型。结果表明, 降雨量对流感传播的影响不显著, 平均风速与流感的传播主要呈现正相关, 平均相对湿度与平均温度与流感的传播主要呈现负相关, 其中, 平均相对湿度的影响更为复杂。时间上, 在流感感染人数快速上升的阶段, 各气象因子的影响程度较为显著, 而在流感传播速度减慢的阶段, 气象因子的影响减弱; 空间上, 各气象要素对流感传播的影响在北京市4大功能分区上存在空间分异性, 这与地区地形、风带、局地气候等因素有关。

关键词: 甲型H1N1流感; 气象因子; 空间分异性; 空间自相关; 地理加权回归; 北京

DOI: 10.11821/dlxb201803006

1 引言

流行性感冒(简称流感)因其传染性强、发病率高而成为严重威胁人类健康的疾病。近百年来曾多次发生世界大流行, 其直接引起的人员伤亡以及间接带来的经济损失成为众多国家面临的重大问题。甲型H1N1流感在2009年席卷全球, 所达之处几乎覆盖了适宜人类聚居的各类气候类型, 环境适应性较强。全球甲型H1N1感染者数量达几千万, 死亡人数过万, 给人类社会造成了巨大的威胁^[1]。2009年5月16日, 北京市出现第一起输入性甲型H1N1病例; 8月初, 甲型H1N1流感疫情开始在北京市本地人群中大范围扩散传播, 本地人群传播超过输入性传播^[2]。而后, 疫苗的成功研制使得北京市甲型H1N1流感疫情得到了控制。

历史经验表明, 传染病的大范围流行往往受到气候环境的制约, 气候变化是中国历史时期发生重大疫灾的主要原因之一^[3-6]。而传染病短期的波动则受到气象因子的显著影响, 流感类传染病更是如此^[1]。甲型H1N1流感病毒作为一个已知的传染病病种, 如果能探明其传播与气象因子之间的关系, 并获取其时空分布规律, 这不仅仅针对甲型H1N1流感提供了对疫情的统计推断以及时空分布推断, 其研究方法和体系也能够推广到其他传染病的研究与防控当中。

对于甲型H1N1流感的研究, 不同研究领域的学者所关注的方向有所不同。基础医疗机构工作者主要集中在空间流行病学、病毒学和免疫学方面的研究^[7-8], 而非医疗工作

收稿日期: 2017-05-08; 修订日期: 2017-12-23

基金项目: 国家级大学生创新创业计划项目(201610027093) [Foundation: National Training Program of Innovation and Entrepreneurship for Undergraduates, No.201610027093]

作者简介: 杨斯棋(1996-), 男, 重庆人, 本科生, 主要研究方向为环境健康地理。E-mail: sqyang@mail.bnu.edu.cn

通讯作者: 董卫华(1976-), 男, 山东人, 教授, 主要研究方向为环境健康制图。E-mail: dongweihua@bnu.edu.cn

者则大多致力于甲型H1N1流感的时空分布模式和影响因子分析以及对于疫情的模拟以及预测^[9-12]。何凡等分析了浙江省甲型H1N1流感活动强度与有关气象因子的相关关系,发现影响甲型H1N1流感阳性检出率的主要气象因子为最低气压、平均风速和降水量^[9]。肖洪等通过建立基于甲型H1N1流感病毒传播力实验结果的气象异常SIR流感传播模型,认为甲型H1N1流感在长沙市的流行与气象条件存在重要联系,且流感的传播过程对气象异常反应敏感^[10]。在探索甲型H1N1流感与不同类型气象因子的关联关系上,曹志冬等利用了相关性统计分析的方法^[2];何凡等采用了Spearman相关分析的方法^[9];肖洪等则使用了热点分析、聚类分析等数据分析方法^[11]。这些方法均基于统计意义层面,宏观尺度上的时空分布格局研究还有所不足。

综上,本文综合考虑时间以及空间上的关联,结合GIS的空间分析方法,以北京市感染甲型H1N1流感人群为研究对象,以2009年5月13日-2009年12月31日为研究时段,以1周为时间单元,街道统计面元为空间单元,利用地理加权回归(Geographically weighted regression, GWR)模型,分析甲型H1N1流感对平均温度、平均相对湿度、平均风速、降雨量的时空响应规律,包括北京地区甲型H1N1流感的时空分布格局,甲型H1N1流感与气象因子的时空关联性,及其在空间上和时间上的分布方式。

2 研究区域概况

北京市位于华北平原北部,坐标范围为115.7°E~117.4°E、39.4°N~41.6°N,总面积约1.64万km²,其中,山区面积约占总面积的62%,平原区约占总面积的38%。由SRTM所提供的全球数字高程模型产品中获取北京市DEM数据(图1)。北京市整体地形呈现西北高、东南低的特点,西部为太行山脉,北部和东北部为军都山,属燕山山脉,高程最低点位于通州区东南边界。北京市气候为典型的北温带季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,年平均降雨量约为500 mm,全年降水的80%集中在夏季。

北京市分为16个市辖区,包括东城、西城、朝阳、丰台、石景山、海淀、门头沟、房山、通州、顺义、昌平、怀柔、平谷、大兴、密云、延庆。

2009年北京市总人口数约为1860万人,其中城六区(原城八区)人口约占总数的60%,属于中心区。大兴、通州、顺义、昌平、门头沟、房山六区处于市中心外围,被划分为北京市近郊区。怀柔、平谷、密云、延庆则属于远郊区。

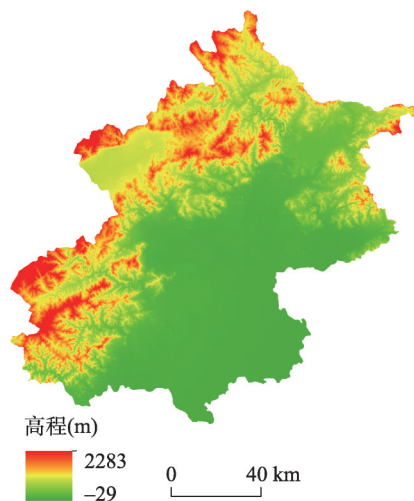


图1 北京市DEM图
Fig. 1 DEM map of Beijing

3 数据与方法

3.1 实验数据与预处理

3.1.1 甲型H1N1病例数据与预处理

本文所采用的甲型H1N1病例数据由北京市疾病预防控制中心提供,共计病例数13762个。空间范围覆盖北京市全部地区,时间范围为2009年5月13日-2009年12月31

日。数据项具体包括病例的就医卡编号、性别、年龄、现住详细地址（统一以“区+街道办事处+街道+门牌号”格式记录）、人群分类、发病日期、诊断时间等信息。本文着眼于流感传播的时空传播变化规律探讨，因此，选取病例数据中的现住详细地址与发病时间两项内容作为后续探讨的数据基础。根据提取的基础信息，采用地理编码的方法，转换为可用于GIS分析的空间数据。将整个时段的病例数据叠加到北京市行政区划地图上上进行空间显示，结果如图2所示。

考虑到不同街道统计单元的人口基数差异对流感传播的影响，所以引入流行病学中的发病率概念。发病率指一定区域范围内、一定时段内，发病人数占区域总人口的比例。考虑到街道统计单元的发病率更能真实反映发病水平^[13]，故本文发病率的的空间单元为街道面元。同时，为避免小样本数据量不足带来的分析误差，本文发病率的时间单元为一周。发病率计算公式如下所示，单位为1/10万。

发病率=(某周某街道面元内甲流新发病数/该时段该街道面元内总人口数)×10万

对病例数据中的零值进行插补。同时，为了消除异方差的影响，将发病率数据取对数处理^[14]。

3.1.2 气象数据与预处理 本文所用气象数据来源于北京市及周边临近省份280个气象站，包括20个人工气象站和260个自动气象站，气象站空间分布如图3所示。各站点提供的数据以天为单位，包括温度、相对湿度、风速、降雨量四类气象要素数据。相关研究表明，气温、相对湿度、风速、降水等气象因子与流感传播流行存在关联关系^[5, 8]。因此，将上述四类气象要素均作为解释变量。

采用克吕金(Kriging)空间插值法对每日的气象数据进行处理，得到各气象要素500 m空间分辨率的栅格插值结果。利用ArcGIS 10.4软件的统计工具，得到以周为时间单元、街道面元为空间单元的各气象数据平均值。

3.1.3 人口数据与预处理 根据北京市2010年第六次人口普查资料(街道卷)以及数据相关说明^[15]，整理得到按北京市街道划分的行政区域人口数据，共计319个街道统计单元的人口数。

3.2 研究方法

3.2.1 地理探测器 地理探测器是中国科学院地理科学与资源研究所王劲峰研究团队提出的一种方法^[16]，主要用于探测空间分异性以及揭示其背后驱动因子。地理探测器包括4个探测器，其中分异及因子探测器主要用于探测某种地理事物Y的空间分异性以及探测某地理因子X多大程度上揭示了该地理事物Y的空间分异^[16]。该方法无线性假设，可以有效克服传统数学统计方法中处理类型变量的局限性，广泛应用于环境健康方面的研究^[17-18]。

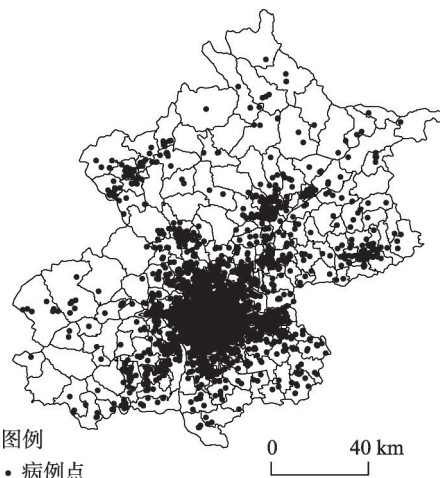


图2 北京市甲型H1N1流感病例空间分布
Fig. 2 The spatial distribution of influenza A (H1N1) in Beijing

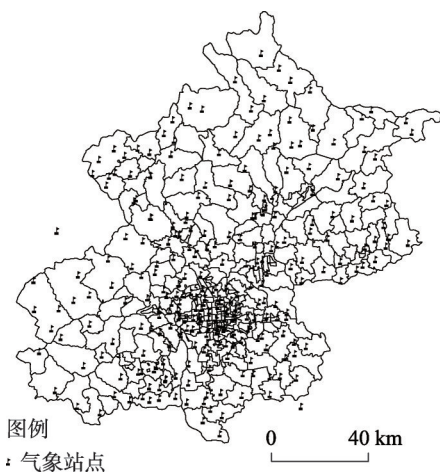


图3 北京市气象站空间分布
Fig. 3 The spatial distribution of meteorological stations

分异及因子探测器的基本思想是,将研究区域划分为若干子区域,如果子区域的方差之和小于区域总方差,则存在空间分异性^[16]。因此,该方法可以用于分析空间各个类型的区域之间的整体差异程度。地理探测器的具体公式为:

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (1)$$

式中: q 是度量空间分异性的指标; $h=1, 2, \dots, L$ 为分类的数目; N_h 和 N 分别为层 h 和全区的样本单元数; σ_h 和 σ 分别为层 h 和全区的方差。 q 的取值范围为 $[0, 1]$, q 值越大,说明空间分异性越明显。

3.2.2 空间自相关分析 空间自相关分析就是研究空间单元观测值是否与其相邻单元的观测值存在相关性的一种分析方法,是空间单元观测值聚集程度的一种度量^[19],可以分为全局空间自相关分析与局部空间自相关分析两大类^[20]。其中,全局空间自相关分析用来分析整个研究区范围内各个单元间的平均关联程度、空间分布模式及其显著性;局部空间自相关用以诊断局部空间区域是否存在不同的空间聚合模式,挖掘数据异质性特征^[21]。

本文采用全局 Moran's I 统计量对北京市流感发病率分布的空间关联性与差异性进行分析,其计算公式为:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad i \neq j \quad (2)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

式中: n 为本文街道单元数量; x_i 或 x_j 为某街道单元 i 或 j 的甲型 H1N1 流感发病率; \bar{x} 为所有街道单元发病率均值; W 为空间权重矩阵。Moran's I 指数的取值范围为 $[-1, 1]$, 在给定显著度水平上,正值代表整体分布呈正相关,值越大,空间单元间的联系越紧密,性质越相似;负值代表整体分布呈负相关,绝对值越大,空间差异性越大。当 Moran's I 指数为 0 时,表示不存在空间相关性,观测对象在空间上随机分布。

利用局部 Getis-Ord G_i^* 进行热点探测,进而分析其局部自相关性。 G_i^* 指数可以很好地反映观测值在局部空间区域上的热点分布,其计算公式为:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j - w_i^* \bar{x}}{s \sqrt{(ns_{1i} - (w_i^*)^2)/(n-1)}} \quad (3)$$

$$w_i^* = \sum_{j=1}^n w_{ij}, \quad s_{1i} = \sum_{j=1}^n w_{ij}^2$$

式中: s 为发病率在整体区域上的标准差。可知, G_i^* 指数绝对值越大,该研究区域的聚集程度越高,形成热点区域,其中, G_i^* 指数为正时,为高值聚集;反之,为低值聚集。

3.2.3 地理加权回归 地理加权回归是一种利用回归原理研究具有空间分布特征的多个变量之间数量关系的方法。它考虑空间局部特征作为权重,所以回归系数 β 不再是全局性的恒定值,而是随着空间位置 i 而变化的 β_i 。它反映了解释变量对被解释变量的影响随着空间位置的变化而变化^[22],其数学表达式如下^[23]:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

式中： (u_i, v_i) 为第 i 个采样点的坐标； $\beta_k(u_i, v_i)$ 为第 i 个采样点上的第 k 个回归参数； $\beta_0(u_i, v_i)$ 为第 i 个采样点上的截距，表示所有解释变量均为零时因变量的预期值； ε_i 是第 i 个采样点上的残差。

由 Fotheringham 等^[23]提出的“接近位置 i 的观察数据比那些离 i 位置远一些的数据对估计有更多的影响”的思想，也即 Tobler 提出的“地理学第一定律 (Tobler's First Law of Geography)”：任何事物都相关，但相近的事物关联更紧密，位置越接近的数据，比距离远的数据对结果影响更大。 $\beta_k(u_i, v_i)$ 通过加权最小二乘法来估计，“加权”是通过权重矩阵来实现，常用的权重矩阵有高斯权函数法和 bi-square 权函数法等。利用加权最小二乘法估计参数的数学表达式如下：

$$\begin{aligned} \hat{\beta}(u_i, v_i) &= [X^T W(u_i, v_i) X]^{-1} X^T W(u_i, v_i) Y \\ X &= \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \cdots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & \cdots & x_{2k} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 1 & x_{n1} & \cdots & x_{nk} \end{bmatrix}, \quad W(u_i, v_i) = W(i) = \begin{bmatrix} W_{i1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & W_{i2} & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & W_{in} \end{bmatrix} \\ Y &= \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \cdots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_0(u_1, v_1) & \beta_1(u_1, v_1) & \cdots & \beta_k(u_1, v_1) \\ \beta_0(u_2, v_2) & \beta_1(u_2, v_2) & \cdots & \beta_k(u_2, v_2) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \beta_0(u_n, v_n) & \beta_1(u_n, v_n) & \cdots & \beta_k(u_n, v_n) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

式中： $\hat{\beta}$ 是 β 的估计值。权重函数需要确定带宽 h ，常用的方法有固定权重和自适应方法，交叉验证方法 (cross-validation, CV) 是较常用的自适应方法。

4 结果与分析

4.1 甲型 H1N1 流感的时空分布

2009 年 5 月-12 月北京市甲型 H1N1 流感新增感染者人数时序变化如图 4 所示。结合新增发病数的数量变化，可将甲型 H1N1 流感在北京的传播大致分为 5 个阶段：

A 阶段：包括 1-15 周，处于 2009 年 5 月-8 月，为流感爆发初期，此时感染人数还较少，新增发病数变化较平缓；

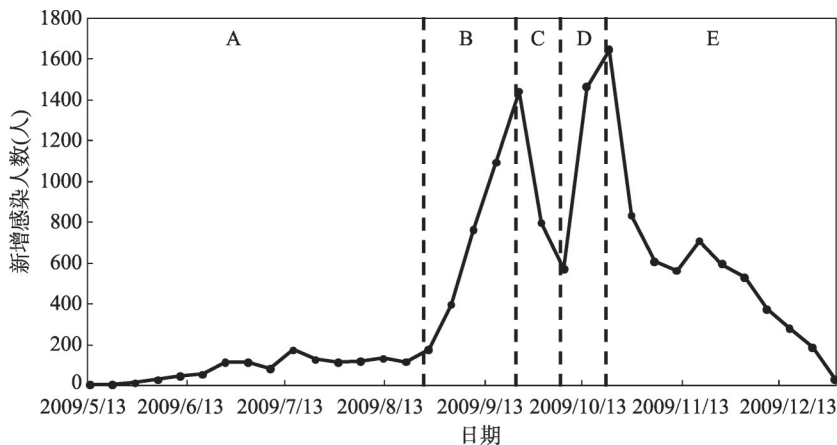


图 4 北京市甲型 H1N1 流感新增感染人数时序变化

Fig. 4 Sequential variation of the number of new infections of influenza A (H1N1) in Beijing

B阶段: 包括16-19周, 处于2009年9月初-9月底, 新增感染人数急剧上升, 第一次达到峰值;

C阶段: 包括20-21周, 处于9月底-10月初, 第一批疫苗上市, 一定程度上缓解了疫情的扩散, 新增感染人数短暂地大幅回落;

D阶段: 包括22-23周, 处于10月初-10月底, 新增感染人数再一次达到峰值;

E阶段: 包括24-34周, 处于10月底-12月底, 此时随着人为防控措施的介入, 疫情得到进一步控制, 整体上新增感染人数逐渐减少, 但疫情缓解的过程中仍存在小幅波动。

由北京市甲型H1N1流感病例空间分布(图2)可知, 甲型H1N1流感在空间上有很强的聚集性, 主要集中分布在北京市的中心地带, 而在远离中心的区域分布较为分散。

统计各街道单元在这5个阶段的平均发病率(图5)。为了验证发病率在这5个阶段存在显著的分异性, 利用地理探测器对这5个阶段的发病率进行分异性检验, 模型中 Y 为各阶段的发病率, X 为阶段数。计算得到的 q 值约为0.410, 显著性检验 p 值为0.000, 说明这5个阶段的发病率呈现出较强的分异性, 且极为显著。北京市甲型H1N1流感发病率整体上呈不规则分布, 但局部地区有集聚现象。其中, 市中心与近郊地区发病率长期处于较高状态, 城市外围区域发病率分布不稳定, 西部与北部地区在传播中后期出现发病率高值区域。

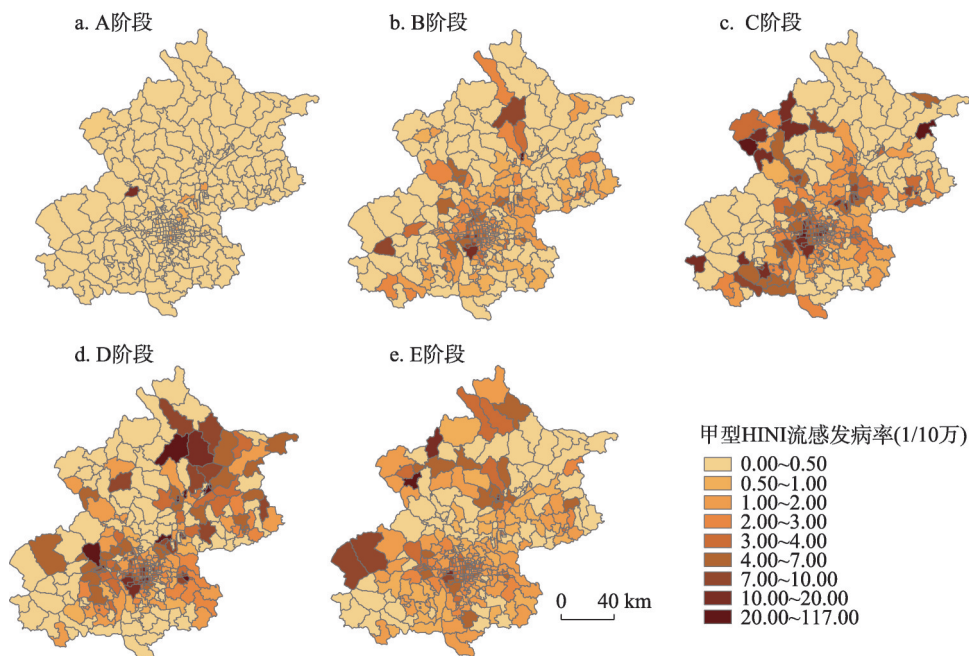


图5 2009年5月-12月北京市甲型H1N1流感各阶段发病率空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of infections of influenza A (H1N1) in each period in Beijing from May 2009 to December 2009

4.2 甲型H1N1流感的空间分布特征

为了对发病率的空间聚集程度进行定量评价, 采取全局空间自相关分析方法与局部空间自相关分析方法, 确定全局Moran's I 指数与局部热点探测显著性统计量, 以反映甲型H1N1流感空间分布的聚集性特征。

结合甲型H1N1流感发病率的时空分布分析, 选取上述流感传播过程中的5个阶段进行分析。通过全局空间自相关统计模型计算得到5个阶段内北京市甲型H1N1流感发病率

的全局 Moran's I 指数及其相应的显著性检验结果, 如表 1 所示。

由表 1 可得, 2009 年 5 个阶段内发病率的空间分布均趋于空间聚集, 其中 B、D 阶段 Moran's I 指数相对较低, 未达到 0.1, 两个阶段的全局空间相关性弱于其它阶段。从标准正态化后的 Z 值可以看到, 各阶段 Z 值均大于正态分布函数在显著性水平为 0.05 时的临界值 1.96, 具有统计学意义, 空间分布形态呈现聚集性, 其中 B 阶段空间聚集性相对较弱。结合各阶段发病率空间分布特征得, 发病率迅速上升阶段的空间自相关性弱于其余阶段, 但整体上均呈现空间聚集特征。

基于上述全局空间自相关性分析, 进行发病率局部 Getis-Ord G_i^* 热点探测分析, 可视化结果如图 6 所示。整个研究时段内均有聚集性区域出现, 其中, 市区中心以及近郊西部地区在大部分时段为高值热点地区, 在发病率迅速上升的 B、C 阶段表现出更强的随机性。此外, 在 A、C、E 阶段, 远郊西部出现热点地区, 在 D 阶段, 东北部出现热点地区。而冷点地区在发病率第一次下降的阶段开始出现, 此后分布面积逐渐增大, 逐渐由外围向中部延伸。

表 1 2009 年北京市甲型 H1N1 流感发病率
全局 Moran's I 分析结果

Tab. 1 Global Moran's I analysis of influenza A (H1N1) in Beijing during five periods

所处阶段	Moran's I	Z 值	置信水平 p	空间格局
A	0.112979	12.005158	0.000000	聚集
B	0.012610	2.118002	0.034175	弱聚集
C	0.147094	13.140709	0.000000	聚集
D	0.064934	5.921416	0.000000	聚集
E	0.124874	11.254920	0.000000	聚集

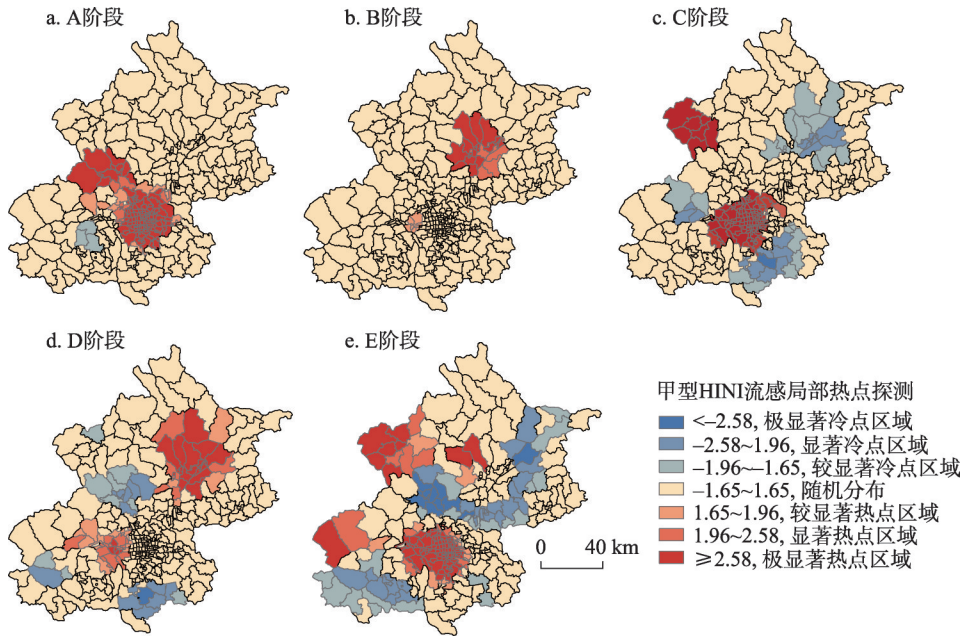


图 6 2009 年 5 月-12 月北京市甲型 H1N1 流感各阶段局部 Getis-Ord G_i^* 分析结果

Fig. 6 Local Getis-Ord G_i^* of infections of influenza A (H1N1) in each period in Beijing from May 2009 to December 2009

4.3 GWR 模型回归结果

基于 GWR4 (Geographically Weighted Regression 4) 软件^[24], 将因变量按街道统计

面元为单元的甲型H1N1流感新增发病率、以及解释变量按街道统计面元为单元的平均温度、湿度、降雨量和风速输入其中, 权重函数选择bi-square函数, 带宽选择交叉验证方法, 输出得到回归结果。

周尺度的GWR模型平均 R^2 为0.274。对每周的回归模型和各解释变量的回归系数进行 F 检验。结果显示, 在所有研究时段的34个周中, 26个周对应的模型都通过了 F 检验, 所占比例为76.5%。未通过的时段很可能受到数据本身质量的影响, 因此后续不再对未通过时段进行各个解释变量的回归系数 F 检验。

当显著性水平 $\alpha=0.05$ 时, 通过率最高的解释变量是平均相对湿度, 通过率为88.5%, 其次, 平均温度通过率为84.6%, 平均风速通过率为80.8%。而降雨量的回归系数只有42.3%, 在大部分周的模型中未通过显著性检验, 所以可认为降雨量对于甲型H1N1流感发病率影响不显著, 故在后续分析将其剔除。

4.4 基于GWR模型的气象因子时空响应

为了消除各气象因子量纲带来的系数数量级差异, 将各气象因子对各街道统计单元发病率的影响程度显著性检验值定义如下^[25]:

$$t = \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{\sigma_x}{\sqrt{n}}}$$

(6)

式中: t 为离差统计量, 表征各因子对疾病发病率的影响程度; \bar{X} 为带宽内因子系数平均值; μ 为对应街区预测系数值, 此处取值为0 (即假设发病率与该气象因子无关); σ_x 为带宽内因子系数标准差; n 为街区数量。 $t > 0$ 代表该因子对应系数为正, 对应的气象要素与发病率的关系呈正相关; $t < 0$ 代表该因子对应系数为负, 对应的气象要素与发病率的关系呈负相关, t 绝对值越大, 影响越显著。

由 t 值以及对应的自由度可以计算出显著性 p 值。当自由度为全区街道数319时, 双侧检验下, 显著性水平 $\alpha=0.01$ 时对应 t 值 ± 2.59 , $\alpha=0.05$ 时对应 t 值 ± 1.97 , $\alpha=0.1$ 时对应 t 值 ± 1.65 。以 t 是正数时为例, t 值大于2.59代表其显著度小于0.01, 说明极为显著。

4.4.1 基于数值的响应分析 根据上述定义, 统计得到了各流感传播阶段内各街道统计单元上各气象因子对应的 t 值。首先, 考虑到气象因子数据值本身的大小可能对流感的传播产生不同的影响, 因此, 在整个研究区域上, 对正、负 t 值所对应的各气象因子的平均值、方差、极值分别进行统计 (表2), 并绘制箱形图 (图7)。

由表2和图7可见, 不考虑奇异值的情况下, 在研究时段内, 风速主体分布在1~2 m/s之间, 其中, t 值大于等于0时, 风速集中在1.5 m/s以上, t 值小于0时, 风速大部分小于1.5 m/s。平均相对湿度主体分布在37%~68%之间, 温度主体分布在17℃~27℃, 正、负 t 值对应的相对湿度、温度数值区间存在一定的重合。由上述结果可以看到, 虽然

表2 对应于正、负 t 值的各气象因子数值统计结果
Tab. 2 The statistic results of each meteorological factor corresponding to t value

	平均风速		平均相对湿度		平均温度	
	$t \geq 0$	$t < 0$	$t \geq 0$	$t < 0$	$t \geq 0$	$t < 0$
平均值	1.831	1.295	58.976	46.180	20.565	17.997
方差	0.385	0.113	87.073	72.281	104.358	64.347
极大值	3.856	3.299	73.017	71.216	36.280	26.626
极小值	0.839	0.665	35.019	32.546	-2.645	-1.698

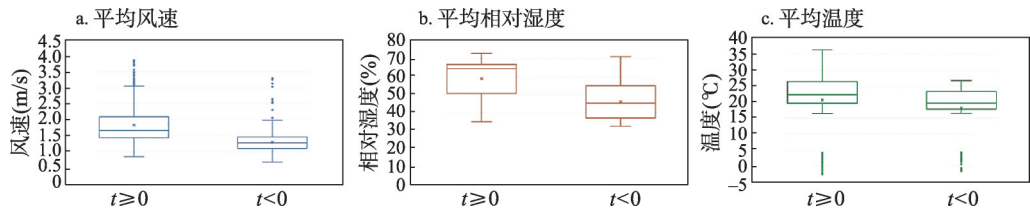


图7 对应于正、负 t 值的各气象因子数值箱形图

Fig. 7 The timeline-based box plot of the value of each meteorological factor corresponding to t value

正向影响与负向影响对应的各气象因子主体分布区间存在差异，但仍然存在明显的交叉区间，说明气象因子数值大小不是影响发病率的单一决定因素，需进一步结合气象因子与发病率的时空分布关系进行分析。

4.4.2 基于时空的响应分析 对每周各个街道统计单元的 t 值进行统计，分析发病率与各气象因子相关关系的时间分布规律。按照时序绘制箱形图（图8）。

由图8知，平均风速与发病率的关系主要呈现正相关，平均相对湿度、平均温度与发病率的关系主要呈现负相关。平均风速在流感传播的A阶段 t 值较为分散，B阶段整体上影响程度较高，且呈现出明显的正相关，即在流感发病率迅速上升的阶段，风速对流感的传播起到了促进作用；平均相对湿度从B阶段开始，与流感发病率呈现负相关，尤其在发病率迅速上升到第二个峰值前的D阶段呈现显著的负相关关系，即平均相对湿度

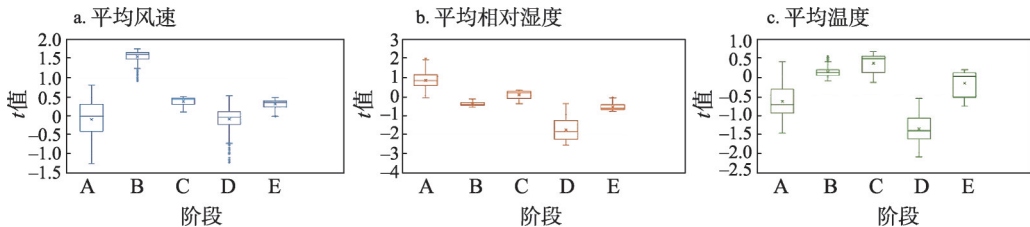


图8 各气象因子 t 值时序箱形图

Fig. 8 The timeline-based box plot of the t value of each meteorological factor

越低，流感传播速度越快；平均温度的影响则更为复杂，在A、D、E阶段内（流感传播初期与流感传播的第二个峰值前后）对流感传播呈现负相关，其中，在D阶段平均温度对流感传播的影响达到较为显著的程度，而在B、C阶段（流感传播的第一个峰值前后）呈现正相关。

根据《北京市“十一五”时期功能区发展规划》，将北京市划分为以下4大城市功能区（图9）：首都功能核心区，包括东城、西城、崇文、宣武；城市功能拓展区，包括朝阳、海淀、丰台、石景山；城市发展新区，包括通州、顺义、大兴、昌平、房山；生态涵养发展区，包括门头沟、平谷、怀柔、密云、延庆。

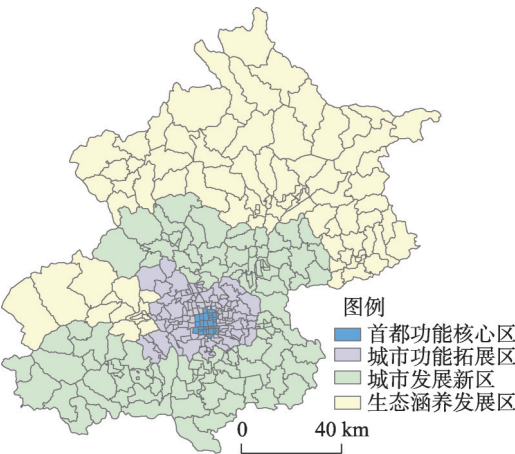


图9 北京市城市功能区域划分示意图

Fig. 9 The map of urban functional zoning in Beijing

基于地理探测器方法, 依据北京市分区标准, 利用式 (1) 计算各气象因子对甲型H1N1流感影响程度的 q 统计值与显著度 p 值 (表3), 并对各气象因子的显著性检验 t 值进行空间显示 (图10)。

由表3可知, 基于地理探测器得到的各气象因子对甲型H1N1流感影响程度的显著性 p 值均为0.000, 说明气象因子的影响在北京市四大分区上存在显著的空间分异性。

由图10a可见, 在北京市整体区域上, 平均风速与发病率的关系呈现正相关关系。由北京市地形可知, 北京西部、北部的生态涵养发展区多为山地, 且受到西北风带、东北风带的影响, 风速普遍较大, 结合发病率对风速数值大小的响应分析可得, 较大的风速主要对流感传播产生促进作用。对于城市发展新区中处于西南部的地区, 虽然山地面积较大, 但由于西北风带与东北风带在北京顺义区汇合, 形成大“Y”型风带南下^[26], 因此西南方向受到的风速影响较小, 风速偏低, 呈现微弱的负相关关系。对于位于平原地

表3 各气象因子的 q 值和 p 值
Tab. 3 The q value and p value of each meteorological factor

	平均风速	平均相对湿度	平均温度
q 值	0.133	0.178	0.232
p 值	0.000***	0.000***	0.000***

注: ***: 表示0.01显著水平。

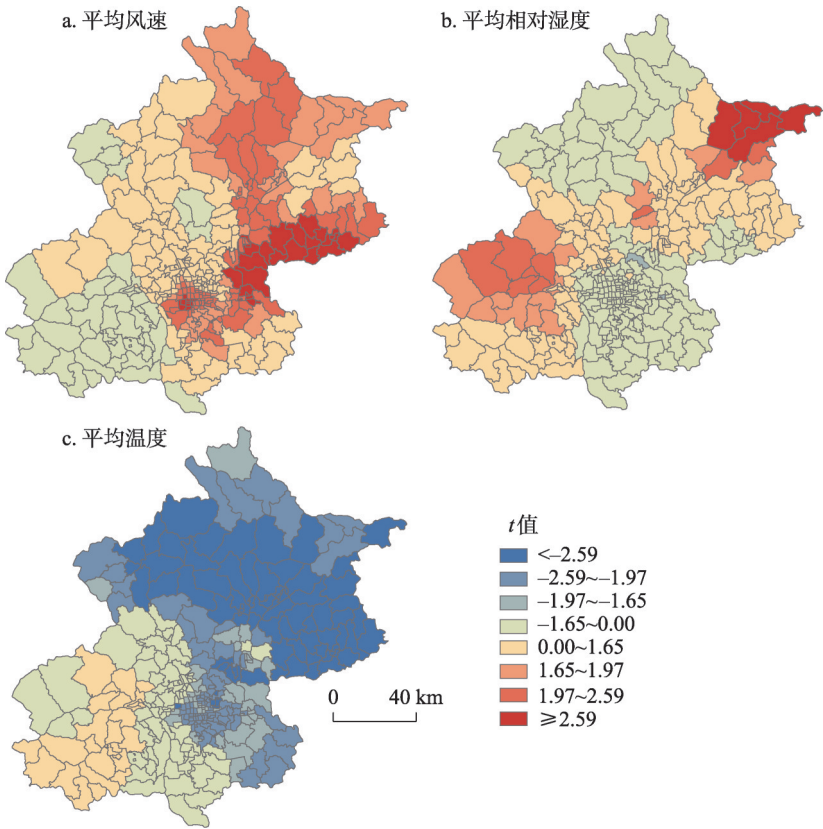


图10 各气象因子的显著性检验 t 值空间分布

Fig. 10 The spatial distribution of t value of each meteorological factor

区的首都功能核心区和城市功能拓展区而言,中部与东部的区域呈现正相关,原因可能在于城市与郊区景观、建筑等影响的差异,城市中心区建筑和绿化对风向和风速的影响明显^[27],城市中心高层建筑多而密集,建筑物的遮挡或拦截会对风向与风速产生影响,形成局地小气候。由于中心人口密集,风速增加会促进流感在人群中的传播。

由图 10b 可见,平均相对湿度对发病率的影响在北京市西北—东南方向呈现负相关,东北—西南方向呈现正相关。首都功能核心区和城市功能拓展区上主要呈现负相关关系,而在西南部的城市发展新区和东北部的生态涵养发展区则呈现正相关关系,其中东北部区域相关性最为显著。结合北京市自然条件可知,东北部与西南部山区均有承接大量降雨量的迎风坡,并且东北部有面积较大的密云水库。而在西北部较为干旱的山区与大部分平原地区,发病率与相对湿度呈现负相关,由此推测在气候较为湿润的多山地地区,发病率与相对湿度呈现正相关,在气候干旱地区或平原地区,则呈现负相关。相对湿度在不同数值水平上对流感传播的影响存在差异,湿度较高呈现促进作用,湿度较低时呈现抑制作用。

由图 10c 可见,在北京市整体区域上,平均温度与发病率的关系呈现负相关关系。由西南向东北,负相关关系逐渐显著。一般而言,流感病毒不宜生活于温度较高的环境中^[28],温度越高,病毒活性越低,流感传播速度越慢,因而北京市流感传播主要体现了随温度负相关变化的特点。

5 结论与讨论

5.1 结论

本文针对 2009 年北京市爆发的甲型 H1N1 流感,基于地理探测器和空间自相关理论,利用 GWR 模型揭示了气象因子与甲型 H1N1 流感发病率的关联关系以及流感传播对气象因子的时空响应规律。结果表明,在不同的传播阶段、不同的空间区域,甲型 H1N1 流感的传播对气象因子的响应有所不同。

在时间变化上,流感传播初期,气象因子对流感传播的影响不显著。在随后流感大规模爆发至第一个峰值前,平均风速的正向影响最为明显。在流感传播的第二个峰值前,平均相对湿度与平均温度的负向影响较为明显。在两个新增感染人数下降的阶段,各气象因子的影响程度相对较弱,可能由于疫苗研制、人为防控等因素的介入,使得气象因子对流感的影响减弱。

在空间分布上,风速对发病率的影响与地区风速大小有关,在风速大的区域促进流感的传播,风速较小的区域则起到一定的抑制作用;相对湿度对发病率的影响较为复杂,从研究结果来看,相对湿度对发病率的影响整体呈现负相关,但在湿度较大的区域则一定程度上促进流感的传播;温度在整体区域上与发病率的关系主要呈现负相关。

5.2 讨论

从本文研究结论可得出,风速、相对湿度、温度是影响甲型 H1N1 流感传播的重要气象因素。其中,风速与流感传播整体呈现正相关关系,这与 Lopez 等^[29]研究结论一致;相对湿度的影响较为复杂,本文结果显示在大部分区域内呈现负相关关系,而在小部分地区则出现相反情形,结合相关研究,平均相对湿度增加会使流感发病风险升高^[30],同时也有研究指出甲型 H1N1 流感传播与相对湿度呈现负相关^[1]。结合病毒自身传播机理,相对湿度较高时病毒的传染性更强,但持久性更低^[12],由本文结果推测,需综合考虑病

毒的传染性和持久性,而从更长时间尺度的历史经验来看,中国重大疫情的传播常在干早期多发^[6],因此,相对湿度对流感传播的负向影响可能更为显著;温度与流感传播整体呈现负相关关系,曹志冬等^[1]研究得到了相一致的结论,这一结果也与长期以来的疫情传播期相吻合,即寒冷时期往往疫灾频繁,温暖期则疫灾稀少^[3-6]。

本文为流感随气象因子响应的研究提出了较为可行的方案,得到了甲型H1N1在时间与空间上对风速、相对湿度、温度的响应规律,初步推断干冷、大风天气下甲型H1N1流感传播力更强。

然而,本文还存在以下局限性:首先,本文数据中未区分病例是输入病例还是本地病例,输入病例可能会对流感传播与本地气象因子的关系分析造成影响;其次,以往研究表明,不同气候类型地区气象因子对流感传播的影响存在差异,本文基于北京市甲型H1N1流感传播进行研究,相关结论可类比于其他气候类型相似的地区,在具体的气候条件下,需进行更具针对性的分析;最后,流感传播受到多种因素的影响,除气象气候等自然条件外,包括内因如病毒变异等病原学特征,以及外因如人为隔离、疫苗研制等多种社会要素。因此,日后应结合内因与外因作进一步研究。

参考文献(References)

- [1] Cao Zhidong, Zeng Dajun, Wang Feiyue, et al. Weather conditions and spatio-temporal spreading risk of the Beijing 2009 influenza A(H1N1) epidemic. *Science & Technology Review*, 2010, 28(8): 26-32. [曹志冬, 曾大军, 王飞跃, 等. 2009年北京市甲型H1N1流行的气象因子与时空传播风险. *科技导报*, 2010, 28(8): 26-32.]
- [2] Cao Zhidong, Zeng Dajun, Wang Quanyi, et al. Epidemiological Features and spatio-temporal evolution in the early phase of the Beijing H1N1 epidemic. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(3): 361-369. [曹志冬, 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(3): 361-369.]
- [3] Gong Shengsheng. Changes of the temporal-spatial distribution of epidemic disasters in 770BC-AD1911 China. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(6): 870-878. [龚胜生. 中国疫灾的时空分布变迁规律. *地理学报*, 2003, 58(6): 870-878.]
- [4] Xu Zhaozhong, Yin Shuyan. Temporal and spatial characteristics of epidemic disasters during Qin and Han Dynasty in China. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2016, 28(9): 85-89. [徐兆红, 殷淑燕. 我国秦汉时期疫灾时空特征分析. *江西农业学报*, 2016, 28(9): 85-89.]
- [5] Wang Huijuan, Li Gang, Kong Dongyan, et al. Geographic features and climatic background analysis of clustering disasters in China during 1526~1530. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2017, 48(3): 405-413. [王会娟, 李钢, 孔冬艳, 等. 1526~1530年我国群聚性灾害的地理特征与气候背景分析. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2017, 48(3): 405-413.]
- [6] Liu Jing, Yin Shuyan. Spatiotemporal distribution of significant epidemic disaster and its relation to climate change during historical period in China. *Journal of Natural Disasters*, 2016, 25(1): 137-146. [刘静, 殷淑燕. 中国历史时期重大疫灾时空分布规律及其与气候变化关系. *自然灾害学报*, 2016, 25(1): 137-146.]
- [7] Żuk T, Rakowski F, Radomski J P. A model of influenza virus spread as a function of temperature and humidity. *Computational Biology & Chemistry*, 2009, 33(2): 176-180.
- [8] Zhou Zhixiang. A seasonal influenza theory and mathematical model incorporating meteorological and socio-behavioral factors. *Journal of Tropical Meteorology*, 2009, 15(1): 1-12.
- [9] He Fan, Lin Junfen, Xu Xuqing. Analysis on relationship between influenza A (H1N1) and meteorological conditions and its prediction model. *Zhejiang Journal of Preventive Medicine*, 2014(7): 649-652. [何凡, 林君芬, 徐旭卿. 甲型H1N1流感与气象因子的关系及预报模型研究. *浙江预防医学*, 2014(7): 649-652.]
- [10] Xiao Hong, Tian Huaiyu, Lin Xiaoling, et al. Influence of extreme weather and meteorological anomalies on outbreaks of influenza A (H1N1). *Chinese Science Bulletin*, 2013(10): 922-930. [肖洪, 田怀玉, 林晓玲, 等. 极端天气与气象异常对甲型H1N1流感暴发的影响. *科学通报*, 2013(10): 922-930.]
- [11] Xiao Hong, Tian Huaiyu, Zhao Jian, et al. Spatio-temporal process and the influencing factors on influenza A (H1N1) pandemic in Changsha. *Chinese Journal of Epidemiology*, 2011, 32(6): 587-592. [肖洪, 田怀玉, 赵瞰, 等. 长沙市2009年甲型H1N1流感时空过程分析及影响因素研究. *中华流行病学杂志*, 2011, 32(6): 587-592.]

- [12] Li Wei, Song Yanling, Wang Changke. Comparability analysis between the climate characteristics of early summer in China and the meteorological conditions during the periods that the A(H1N1) flu spread in America and broke out in Mexico. *Science & Technology Review*, 2009, 27(11): 19-22. [李威, 宋艳玲, 王长科. 甲型 H1N1 流感在美国传播期和墨西哥爆发期的气象条件与中国初夏气候特点的相似分析. *科技导报*, 2009, 27(11): 19-22.]
- [13] Dong Weihua, Li Xianen, Yang Peng, et al. The effects of weather factors on hand, foot and mouth disease in Beijing. *Scientific Reports*, 2016, 6: 19247.
- [14] Yan Jun, Shu Xueming, Yuan Hongyong. Relationship between spatial distribution of thief crime and geographical factors. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2010(2): 174-176. [颜峻, 疏学明, 袁宏永. 盗窃犯罪空间分布与地理因素的关联. *清华大学学报自然科学版*, 2010(2): 174-176.]
- [15] Beijing Municipal Bureau of Statistics. *Census Data of Beijing in 2010*. Beijing: China Statistics Press, 2011. [北京市统计局. 北京市 2010 年人口普查资料(上册). 北京: 中国统计出版社, 2011.]
- [16] Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134. [王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.]
- [17] Wang Jinfeng, Li Xinhui, George Christakos, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(1): 107-127.
- [18] Wang Jinfeng, Hu Yi. Environmental health risk detection with GeogDetector. *Environmental Modelling & Software*, 2012, 33(10): 114-115.
- [19] Garten R J, Davis C T, Russell C A, et al. Antigenic and genetic characteristics of swine-origin 2009 A (H1N1) influenza viruses circulating in humans. *Science*, 2009, 325(5937): 197.
- [20] Shan Ke, Xu Lingzhong, Gai Ruoyan, et al. Spatial analysis to tuberculosis epidemic in China based on Geography Information System, 2002-2011. *Chinese Journal of Public Health*, 2014, 30(4): 388-391.
- [21] Li Meifang, Ou Jinpei, Li Xia. Spatio-temporal analysis of influenza A (H1N1) in China during 2009-2013 based on GIS. *Geographical Research*, 2016, 35(11): 2139-2152. [李美芳, 欧金沛, 黎夏. 基于地理信息系统的 2009-2013 年甲型 H1N1 流感的时空分析. *地理研究*, 2016, 35(11): 2139-2152.]
- [22] Wang Jinfeng, Liao Yilan, Liu Xin. *Spatial Data Analysis Course*. Beijing: Science Press, 2010. [王劲峰, 廖一兰, 刘鑫. 空间数据分析教程. 北京: 科学出版社, 2010.]
- [23] Fotheringham A S, Brunson C, Charlton M. *Geographically Weighted Regression: The Analysis of Spatially Varying Relationships*. New York: Wiley, 2002.
- [24] Haining R P. *Spatial Data Analysis: Theory and Practice*. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [25] Bai Zhen, Cao Wei. Contact Mathematics and T the examination obviously examine the inside's comparison research in the difference. *Fujian Sports Science and Technology*, 2005, 24(5): 9-11. [白震, 曹伟. 联系数学与 T 检验在差异显著性检验中的比较研究. *福建体育科技*, 2005, 24(5): 9-11.]
- [26] Ding Jun. Nankou- Ma Chikou Ventilation System: Irreplaceable Ecological Resources of Fresh Air Utilization in Beijing Urban Area. Beijing: Social Science Academic Press, 2014: 107-123. [丁军. 南口—马池口新风库: 北京城区新风利用不可替代的生态稀缺资源. 北京: 社会科学文献出版社, 2014: 107-123.]
- [27] Gao Wei, Chen Jinghui, Liu Benyu. Research on the microclimate of different residential quarters in Kunming. *Journal of Yunnan University*, 2009(Suppl.2): 459-463. [郜伟, 陈靖晖, 刘本玉. 昆明市不同住宅区小气候的研究. *云南大学学报自然科学版*, 2009(Suppl.2): 459-463.]
- [28] Lowen A C, Mubareka S, Steel J, et al. Influenza virus transmission is dependent on relative humidity and temperature. *Plos Pathogens*, 2007, 3(10): 1470.
- [29] Lopez D, Gunasekaran M, Murugan B S, et al. Spatial big data analytics of influenza epidemic in Vellore, India. *IEEE International Conference on Big Data*. IEEE, 2014: 19-24.
- [30] Wang Wei. Study on epidemic characteristics of influenza and relationship with meteorological factors in Shandong province, 2009-2014[D]. Jinan: Shandong University, 2016. [王伟. 2009-2014 年山东省流感样病例流行特征及其与气象因素关系研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.]

The spatio-temporal response of influenza A (H1N1) to meteorological factors in Beijing

YANG Siqu¹, XING Xiaoyue¹, DONG Weihua², LI Shuaipeng¹, ZHAN Zhicheng¹,
WANG Quanyi³, YANG Peng³, ZHANG Yi³

(1. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

3. Beijing Center for Diseases Prevention and Control, Beijing 100013, China)

Abstract: In order to explore the response of influenza A (H1N1) to meteorological factors, we analyzed the spatio-temporal distribution of influenza A (H1N1) in Beijing using global Moran's I and local Getis-Ord G_i^* . The regression model between influenza A (H1N1) and average wind speed, precipitation, average relative humidity, average temperature was established, based on the geographical weighted regression (GWR) model. The results showed that there was no obvious correlation between influenza A (H1N1) and the precipitation, while a strong positive correlation between influenza A (H1N1) and average wind speed was found. The average temperature and the average relative humidity had a strong negative correlation with the spread of influenza A (H1N1) in Beijing, while the latter presented a more complex impact on the spread of it. In terms of the spatio-temporal variation, the impact of meteorological factors was significant during the period when the number of influenza A (H1N1) infections rose rapidly, while it decreased when the number of infections rose slowly. Regarding the spatial variation, the spatial heterogeneity of the impact of each meteorological factor on the four functional zones of Beijing was obvious, which might be related to regional conditions such as local terrain, wind zone, and local climate.

Keywords: influenza A (H1N1); meteorological factors; spatial heterogeneity; geographical weighted regression (GWR); Beijing