

# 北京市 2008–2018 年肺结核时空分布及影响因素分析

尹金凤<sup>1</sup> 黄若雯<sup>2</sup> 姜慧<sup>1</sup> 高志东<sup>3</sup> 许王莉<sup>4,5</sup> 贺晓新<sup>3</sup> 李卫民<sup>1</sup>

<sup>1</sup>首都医科大学附属北京胸科医院, 北京 101149; <sup>2</sup>北京师范大学数学科学学院 100875;

<sup>3</sup>北京结核病控制研究所 100035; <sup>4</sup>中国人民大学统计学院, 北京 100872; <sup>5</sup>中国人民大学应用统计科学研究中心, 北京 100872

尹金凤和黄若雯对本文有同等贡献

通信作者: 许王莉, Email: wlxu@ruc.edu.cn; 高志东, Email: guhu751029@126.com

**【摘要】 目的** 分析 2008–2018 年北京市肺结核报告发病率的时空分布特征及影响因素。**方法** 肺结核病例数据来源于 2008–2018 年中国疾病预防控制中心信息系统结核病信息管理系统, 采用 ArcGIS 10.2 软件可视化肺结核发病率的时空分布; 街道/乡镇尺度上分析(Getis's  $G_i^*$  统计量)发病率的时空聚集性; 贝叶斯时空模型分析影响其时空分布的因素包括城市化率、人均 GDP、每千人口医院床位数、常住外来人口和人口密度。**结果** 2008–2018 年北京市肺结核报告发病率呈下降趋势, 从 58.64/10 万下降到 30.43/10 万。通州区、昌平区等城市发展新区的发病率较高, 热点集中在其局部地区; 东城区、西城区等功能核心区及拓展区的发病率较低, 冷点也集中在该区域。肺结核发病风险与城市化率和常住外来人口相关, 其中, 城市化率每增加 1%, 患肺结核的  $RR$  值也会增加 1%; 常住外来人口每增加 1 万人, 患肺结核的  $RR$  值会增加 0.6%。**结论** 北京市肺结核的防控重点区域需关注城市发展新区; 城市化进程加快的同时, 需加强常住外来人口中的结核病防控, 以期降低当地结核病发病率。

**【关键词】** 肺结核; 报告发病率; 城市化; 贝叶斯时空模型; 时空分布

**基金项目:** 北京市自然科学基金重点研究专项(Z200001); 国家自然科学基金(U1903118); 北京市医院管理局“登峰”人才计划(DFL20181602)

## Spatio-temporal distribution of pulmonary tuberculosis and influencing factors in Beijing, 2008-2018

Yin Jinfeng<sup>1</sup>, Huang Ruowen<sup>2</sup>, Jiang Hui<sup>1</sup>, Gao Zhidong<sup>3</sup>, Xu Wangli<sup>4,5</sup>, He Xiaoxin<sup>3</sup>, Li Weimin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Beijing Chest Hospital, Capital Medical University, Beijing 101149, China; <sup>2</sup>School of Mathematical Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; <sup>3</sup>Beijing Research Institute of Tuberculosis Control, Beijing 100035, China; <sup>4</sup>School of Statistics, Renmin University of China, Beijing 100872, China; <sup>5</sup>Center for Applied Statistics, Renmin University of China, Beijing 100872, China

Yin Jinfeng and Huang Ruowen contributed equally to the article

Corresponding authors: Xu Wangli, Email: wlxu@ruc.edu.cn; Gao Zhidong, Email: guhu751029@126.com

**【Abstract】 Objective** To understand the spatiotemporal distribution of pulmonary tuberculosis (TB) and influencing factors in Beijing from 2008 to 2018. **Methods** The incidence data of pulmonary TB in Beijing from 2008 to 2018 were from Tuberculosis Information Management System of Chinese Disease Prevention and Control Information System. Software ArcGIS 10.2 was used to visualize the spatiotemporal distribution of pulmonary TB incidence. Getis's  $G_i^*$  statistic was applied to analyze the spatial clustering of pulmonary TB incidence at street/

DOI: 10.3760/cma.j.cn112338-20210106-00008

收稿日期 2021-01-06 本文编辑 斗智

引用本文: 尹金凤, 黄若雯, 姜慧, 等. 北京市 2008–2018 年肺结核时空分布及影响因素分析[J]. 中华流行病学杂志, 2021, 42(7): 1240–1245. DOI: 10.3760/cma.j.cn112338-20210106-00008.



township scale. Bayesian spatiotemporal model was applied to analyze factors affecting its spatiotemporal distribution, including urbanization rate, GDP per capita, number of hospital beds per thousand population, permanent migrant population and population density. **Results** The reported pulmonary TB incidence showed a downward trend in the past 11 years in Beijing, from 58.64/100 000 to 30.43/100 000. The incidences were higher in Tongzhou, Changping and other newly developed urban districts, with the hot spots concentrated in local areas of these districts. The incidences of pulmonary TB were lower in Dongcheng, Xicheng and other old urban districts-with the cold spots also concentrated in these area. The risk for the incidence of pulmonary TB was associated with the urbanization rate and the permanent migrant population. For every 1% increase in the urbanization rate, the relative risk of pulmonary TB would increase by 1%. For every 10 000 person increase of permanent migrant population, the relative risk of pulmonary TB would increase by 0.6%. **Conclusions** In Beijing, the current pulmonary TB prevention and control needs to be focused on the newly developed urban areas. Due to the accelerated process of urbanization, it is necessary to strengthen TB prevention and control in permanent migrant population to reduce the incidence of TB in Beijing.

**【Key words】** Pulmonary tuberculosis; Reported incidence; Urbanization; Bayesian model; Spatio-temporal distribution

**Fund programs:** Natural Science Foundation of Beijing (Z200001); National Natural Science Foundation of China (U1903118); "Climbing the Peak" Training Program Foundation for the Talents of Beijing Hospital Administration (DFL20181602)

2015 年北京市肺结核报告发病率为 32.2/10 万<sup>[1]</sup>, 低于我国平均水平(63.4/10 万)<sup>[2]</sup>, 但与同为国际化大都市的纽约<sup>[3]</sup>(3.0/10 万)和东京(16.10/10 万)相比, 仍处于较高水平。既往研究采用泊松回归模型分析发现, 2000–2006 年北京市结核病发病率存在明显空间聚集性, 并与流动人口(非北京市户籍, 在北京居住时间 $\geq 1$  个月)密切相关<sup>[4]</sup>。流行病学调查和结核分枝杆菌全基因组序列分析相结合<sup>[5]</sup>, 传统 logistic 回归模型分析发现推动城市中心结核病发病的主要机制是流动人口和本地居民之间的传播。最新研究表明<sup>[6]</sup>, 我国结核病发病率如果仍维持目前的下降速度, 不可能实现 WHO 2035 年终止结核病目标。因此, 探寻新的防控策略和手段迫在眉睫。

随着工业化的推进, 城市化不可避免。城市化分为经济城市化和人口城市化。国外尽管有大、中城市结核病发病率高于国家平均水平的报道<sup>[7]</sup>, 但城市化对结核病流行的定量影响缺少深入研究。传统回归模型要求个体间相互独立, 由于受共同环境的影响, 个体很可能彼此相关。因此为了发现更深层次的危险因素, 学者们会使用更符合客观事实的、考虑了空间相关性的贝叶斯时空模型。在其他传染病领域, 例如 Tian 等<sup>[8]</sup>已经采用贝叶斯时空模型分析发现了城市化对猩红热流行的影响。在我国城市化进程加速的情况下, 深入探讨城市化对结核病流行的影响将是未来防控的重点。因此, 本研究采用贝叶斯时空模型, 分析 2008–2018 年北京市

肺结核报告数据的热点和冷点地区、城市化对肺结核时空分布的影响, 为北京市及其他大城市结核病精准防控提供参考依据。

## 资料与方法

1. 资料来源: 2008–2018 年北京市肺结核病例报告数据来源于中国疾病预防控制中心信息系统结核病信息管理系统, 按照发病日期、现住址北京市、已审核等条件, 下载肺结核传染病报告卡个案; 人口数据来源于北京市统计局统计年鉴<sup>[9]</sup>。每千人口拥有床位数由北京市卫生健康委员会提供。①常住人口: 在北京市实际居住时间 $\geq 6$  个月; ②常住人口: 非北京市户籍, 来自其他省(自治区、直辖市), 在北京市实际居住时间 $\geq 6$  个月; ③城镇化率: 城镇人口/常住人口, 各区域城镇化率仅包括 2010–2018 年数据; ④人均国内生产总值(GDP): GDP/常住人口; ⑤人口密度: 常住人口/土地面积。根据城市的功能定位, 将北京市 16 个区划分 3 个区域: ①功能核心及拓展区(东城区、西城区、朝阳区、丰台区、石景山区、海淀区); ②城市发展新区(房山区、通州区、顺义区、昌平区、大兴区); ③生态涵养发展区(门头沟区、怀柔区、平谷区、密云区、延庆区)。

### 2. 研究方法:

(1) 肺结核报告发病率及时空分布: 采用 ArcGIS 10.2 软件可视化分析北京市肺结核的空间

分布,以区(县)为尺度。

(2)贝叶斯时空模型:采用2010-2018年各区肺结核病例数据及人口数据研究城市化率、人均GDP、每千人口医院床位数和常住外来人口对肺结核报告发病率的影响。本研究假定第*i*(*i*=1,2,...,16)个区第*t*(*t*=1,2,...,9)年肺结核发病数服从泊松分布,即  $y_{it} \sim \text{Poisson}(\lambda_{it})$ , 其中  $E(y_{it}) = \lambda_{it} = e_{it}\theta_{it}$ 。  $e_{it}$  表示第*i*个区第*t*年肺结核期望发病人数;  $\theta_{it}$  表示第*i*个区第*t*年疾病发病人数与期望发病人数之比,即疾病发病的RR值。采用  $\theta_{it}$  的log函数形式建立贝叶斯时空模型,模型的数学形式<sup>[10]</sup>:

$$\log(\theta_{it}) = \beta_0 + \sum_{k=1}^5 x_{ik}\beta_k + u_i + v_t$$

其中  $\beta_0$  为截距,  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 5$ ) 分别表示城市化率、人口密度、人均GDP、每千人口医院床位数、常住外来人口,  $\beta_1, \dots, \beta_5$  表示相应变量的回归系数。  $u_i$  为空间结构效应,反映空间依赖性,假设其服从条件自回归过程,在该过程中,每一个  $u_i$  的条件分布为一个正态分布,其均值是相邻区域  $u_j, i \neq j$  的加权平均,即<sup>[11]</sup>

$$u_i | u_{j,i \neq j} \sim N\left(\sum_{j \in \delta_i} u_j / n_{\delta_i}, \sigma_e^2 / n_{\delta_i}\right)$$

其中  $\delta_i$  为*i*地区的一阶邻域;  $n_{\delta_i}$  为*i*地相邻区域的数量;  $\sigma_e^2$  为空间效应的方差。  $v_t$  为时间结构效应,其先验分布为一阶自回归AR(1),此时*t*时刻的时间效应  $v_t$  只与前一时刻的时间效应  $v_{t-1}$  有关,即  $v_t = \rho v_{t-1} + \varepsilon_t$ 。使用WinBUGS 1.4.3软件采用马尔可夫链蒙特卡洛模拟估计参数值,得到参数后验估计的均值和95%CI。

(3)肺结核报告发病率的热点分析:以街道/乡镇为尺度分析北京市肺结核发病聚集区域的具体位置与类型,街道/乡镇人口数使用2010年北京市人口普查数据<sup>[12]</sup>。使用ArcGIS 10.2软件计算Getis's  $G_i^*$  统计量用于检测研究区域的热点地区。若统计量  $G_i^* \geq 1.96$  表明地区*i*及其相邻地区的肺结核报告发病率与其他地区差异有统计学意义,地区

*i*的肺结核报告发病率较高,认为是发病率的热点地区<sup>[13]</sup>。

### 结 果

1. 肺结核报告发病率及其时空分布:2008-2018年北京市共报告83 599例肺结核病例。肺结核报告发病率由2008年的58.64/10万下降到2018年的30.43/10万,降幅为48.10%。2008-2018年平均发病率较高的2个区分别为昌平区(56.83/10万)和门头沟区(50.97/10万);平均发病率较低的2个区分别为延庆区(24.91/10万)和怀柔区(24.78/10万)。降幅较高的区为昌平区(72.30%)和丰台区(64.86%),降幅较低的区为房山区(-6.62%)和平谷区(-24.33%) (图1)。2008-2018年功能核心及拓展区(37.27/10万)和生态涵养发展区(33.19/10万)平均发病率较低,而城市发展新区(40.16/10万)平均发病率较高。

2. 影响因素:采用贝叶斯时空模型对城市化率、人口密度和常住外来人口等因素进行分析发现城市化率和常住外来人口均会增加患肺结核的RR

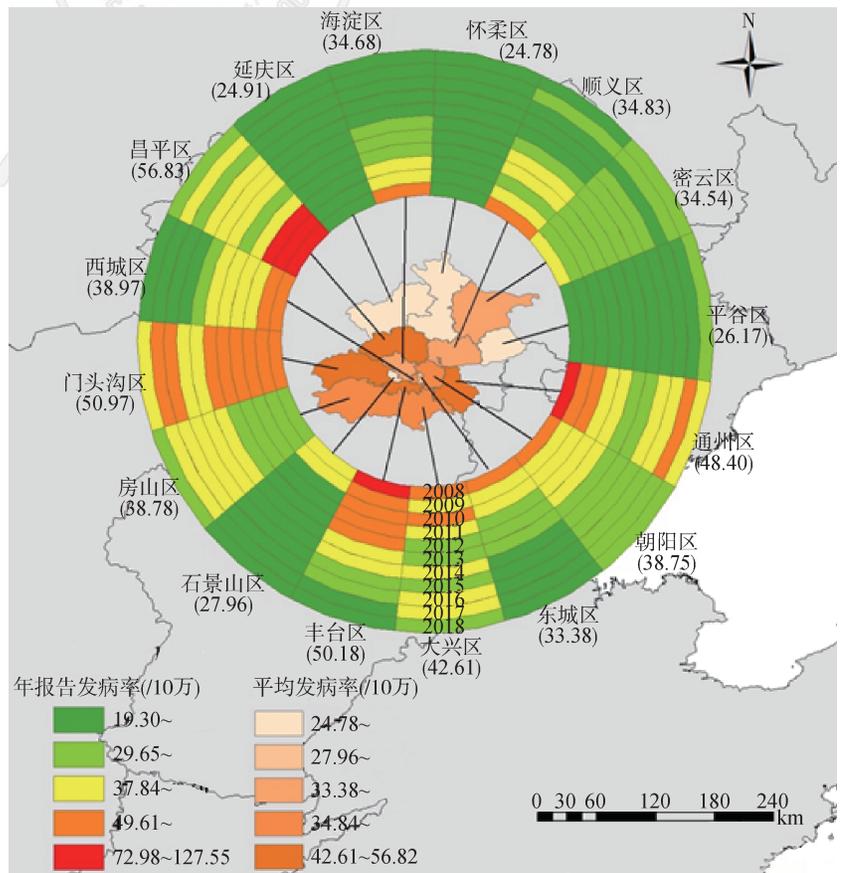


图1 2008-2018年北京市各区肺结核报告发病率的时空分布

值(表 1),城市化率每增加 1%,RR 值会增加 1%;常住外来人口每增加 1 万人,RR 值会增加 0.6%。而人口密度、人均 GDP、每千人口医院床位数对肺结核发病风险的影响并不显著(表 1)。2008–2018 年,北京市城市化率从 85% 上升到 87%,增加了 2%;常住外来人口数由 465.1 万增加到 764.6 万,增加了 299.5 万(图 2)。

表 1 贝叶斯模型回归系数值

| 变量            | 均值(95%CI)            | 后验估计 RR 值(95%CI)   |
|---------------|----------------------|--------------------|
| 城市化率(%)       | 0.010(0.003~0.018)   | 1.010(1.003~1.018) |
| 人口密度          | -0.016(-0.044~0.011) | 0.984(0.957~1.011) |
| 人均国内生产总值(GDP) | -0.008(-0.031~0.015) | 0.992(0.969~1.015) |
| 每千人口医院床位数     | 0.010(-0.001~0.019)  | 1.010(0.999~1.020) |
| 常住外来人口        | 0.006(0.004~0.008)   | 1.006(1.004~1.008) |



图 2 2008–2018 年北京市城市化率及常住外来人口的变化

3. 城市化率差异和外来人口数量差异对肺结核报告发病率的影响:功能核心及拓展区,肺结核报告发病率下降速度最快(30.27%),由 2010 年的 40.80/10 万下降到 2018 年的 28.45/10 万;该区域的城市化率最高,2018 年达到 99.75%;常住外来人口负增长,下降 6.62%。城市发展新区肺结核报告发病率下降较慢,由 2010 年的 41.20/10 万下降到 2018 年的 34.18/10 万,降幅为 17.04%;该区域的城市化率为 70.97%(2018 年),同时常住外来人口增长最快,涨幅为 35.92%。生态涵养发展区,肺结核报告发病率下降速度最慢,由 2010 年的 35.14/10 万下降到 2018 年的 29.84/10 万,降幅为 15.07%;该区域的城市化率较低,为 66.96%(2018 年);同时常住外来人口呈增长趋势,涨幅为 8.47%(表 2)。

4. 肺结核报告发病率热点分析:2016–2018 年热点地区主要集中在城市发展新区局部,昌平区肺结核报告发病率的热点地区变化不大,主要集中在阳坊镇、马池口地区、城北街道、城南街道、南邵镇、崔村镇、兴寿镇。通州区与朝阳区交界处及顺义区与通州区交界处也是热点地区,即宋庄镇、永顺镇、潞城镇、梨园镇、张家湾镇、台湖镇、李桥镇。另外房山区北部的霞云岭乡、史家营乡、大安山乡、佛子庄乡及门头沟区的大台街道、王平镇、妙峰山镇是肺结核热点地区。冷点地区主要集中在功能核心

表 2 北京市各地区城市化率及外来人口变化对肺结核报告发病率的影响

| 地区       | 报告发病率(/10 万) |        |         | 城市化率(%) |        |         | 常住外来人口(万) |        |         |
|----------|--------------|--------|---------|---------|--------|---------|-----------|--------|---------|
|          | 2010 年       | 2018 年 | 变化幅度(%) | 2010 年  | 2018 年 | 变化幅度(%) | 2010 年    | 2018 年 | 变化幅度(%) |
| 功能核心及拓展区 | 40.80        | 28.45  | -30.27  | 99.47   | 99.75  | 0.29    | 433.80    | 405.10 | -6.62   |
| 东城区      | 42.76        | 25.62  | -40.10  | 100.00  | 100.00 | 0.00    | 22.00     | 16.50  | -25.00  |
| 西城区      | 43.20        | 28.03  | -35.11  | 100.00  | 100.00 | 0.00    | 32.70     | 22.30  | -31.80  |
| 朝阳区      | 43.03        | 31.69  | -26.35  | 99.64   | 99.89  | 0.25    | 151.50    | 157.90 | 4.22    |
| 丰台区      | 72.97        | 27.45  | -62.39  | 99.36   | 99.81  | 0.45    | 81.30     | 69.80  | -14.15  |
| 石景山区     | 28.32        | 23.37  | -17.51  | 100.00  | 100.00 | 0.00    | 20.70     | 15.20  | -26.57  |
| 海淀区      | 42.20        | 23.82  | -43.54  | 97.80   | 98.81  | 1.03    | 125.60    | 123.40 | -1.75   |
| 城市发展新区   | 41.20        | 34.18  | -17.04  | 66.37   | 70.97  | 6.93    | 240.00    | 326.20 | 35.92   |
| 房山区      | 36.12        | 37.44  | 3.64    | 67.24   | 74.58  | 10.92   | 19.50     | 30.60  | 56.92   |
| 通州区      | 62.30        | 42.37  | -31.99  | 61.15   | 67.62  | 10.57   | 43.50     | 65.70  | 51.03   |
| 顺义区      | 36.91        | 27.84  | -24.59  | 53.78   | 56.46  | 4.98    | 27.90     | 46.70  | 67.38   |
| 昌平区      | 92.35        | 35.34  | -61.74  | 78.93   | 83.06  | 5.24    | 84.70     | 106.70 | 25.97   |
| 大兴区      | 53.82        | 32.08  | -40.39  | 70.74   | 73.11  | 3.35    | 64.40     | 76.50  | 18.79   |
| 生态涵养发展区  | 35.14        | 29.84  | -15.07  | 62.00   | 66.96  | 8.01    | 30.70     | 33.30  | 8.47    |
| 门头沟区     | 51.79        | 45.34  | -12.44  | 85.57   | 89.12  | 4.16    | 4.70      | 5.20   | 10.64   |
| 怀柔区      | 25.07        | 23.21  | -7.41   | 67.87   | 70.05  | 3.21    | 10.30     | 10.30  | 0.00    |
| 平谷区      | 21.65        | 30.80  | 42.29   | 52.85   | 57.89  | 9.54    | 4.90      | 5.10   | 4.08    |
| 密云区      | 30.49        | 32.86  | 7.78    | 55.05   | 59.39  | 7.89    | 6.90      | 7.90   | 14.49   |
| 延庆区      | 24.10        | 20.88  | -13.35  | 48.64   | 58.33  | 19.94   | 3.90      | 4.80   | 23.08   |

及拓展区局部(图3)。

### 讨 论

本研究基于 2008–2018 年北京市肺结核报告发病数据和人口统计学数据,采用马尔可夫链蒙特卡罗方法和贝叶斯时空模型,对北京市肺结核时空分布进行了分析。贝叶斯时空模型能将数据中蕴含的时间信息、空间信息和参数的不确定性(先验分布)以及与时空关联的相关因素整合于同一模型中,解决了空间结构带来的估计偏差,使估计值更加稳定和可靠<sup>[14]</sup>。本研究发现,城市化率每增加 1%,患肺结核的 *RR* 值也会增加 1%,常住外来人口每增加 1 万人, *RR* 值会增加 0.6%。因此,城市化和常住外来人口可能是北京市肺结核报告发病率下降缓慢的重要因素。

既往基于贝叶斯时空模型的研究表明,城市化对传染病,例如猩红热的流行呈间接的正相关,而外来人口则呈直接正相关<sup>[8]</sup>。本研究也发现,城市化率和常住外来人口均会增加患肺结核的 *RR* 值,北京市城市化率在 2008–2018 年增加了 2%,常住外来人口增加了 299.5 万,这也是北京市肺结核报告发病率下降缓慢的重要原因之一。对北京市

9 年来的 3 个功能区的城市化率和常住外来人口数据进一步分析发现,功能核心及拓展区的城市化率最高,变化波动小,该区域医疗、文化和商业设施较完备,但因房价高昂,常住外来人口增长速度呈下降趋势。综合两方面因素,该区域的肺结核报告发病率最低。而城市发展新区,虽然城市化率不如功能核心区,但上升趋势较明显,另外鉴于房价便宜,常住外来人口急剧增加,因相应的商业、文化、教育、医疗等水平跟不上人口增长速度,从而导致肺结核报告发病率居高不下。对生态涵养区而言,城市化率和常住外来人口增长速度均较低,因此肺结核报告发病率也维持在较低水平。但是需要注意的是,未来如果城市化进程迅速提高,该区域需效仿功能核心及拓展区的发展模式,避免肺结核报告发病率增高的现象。

为了进一步验证上述影响因素,本研究以街道/乡镇为尺度对北京市肺结核进行空间聚类发现,肺结核发病热点集中在城市发展新区局部(通州、昌平、房山和门头沟)。自 2016 年通州正式定为北京城市副中心后,流动人口数量急剧上升,尤以通州区与朝阳区以及通州区与顺义区的交界处最多,该区域是肺结核的高发地区。另外,昌平区的回龙观、沙河、北七家和东小口等地区亦是外来

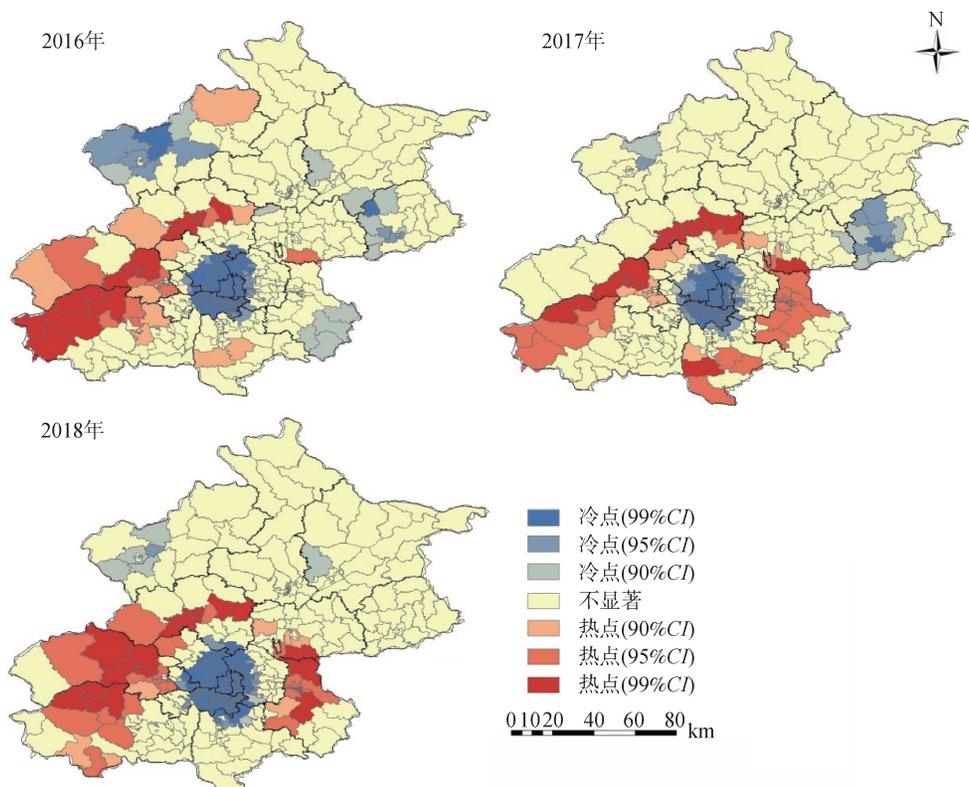


图3 2016–2018年北京市肺结核报告发病率的热点分析

人口聚集地<sup>[12]</sup>,上述地区 2018 年的外来人口已达 106.7 万<sup>[9]</sup>,因此该区域亦是需要高度防范地区。随着城市的扩张及当地经济社会的迅猛发展,可能存在着外来人口继续向昌平区北部扩张的现象,例如北部的阳坊镇等地区近年来肺结核报告发病率持续升高。房山区报告发病率偏高的地区位于其西北部。该区与其他区相比存在经济发展水平较低,卫生人力资源不足等问题。门头沟区一直是北京市肺结核的高发区<sup>[1,15]</sup>。该区人均 GDP 低于北京市平均水平,经济发展水平可能是该区肺结核高发的重要因素之一。2008-2018 年北京市结核病冷点地区主要集中在功能核心及拓展区局部。小尺度热点分析结果也验证了城市化和外来人口对北京市肺结核时空分布的影响。

本研究存在局限性。人口数据的收集均来自北京市统计年鉴且缺少各地区 2008-2009 年的城市化率数据,在进行贝叶斯时空模型的拟合时,可能会导致一定的偏差。街道/乡镇尺度的肺结核报告发病率的计算采用了 2010 年第六次全国人口普查数据,各年报告发病率的计算不够精确。后续研究还将进一步收集更详细的数据,开展更加深入细致的研究。

就全球范围而言,城市化进程步伐加快,到 2050 年预计城市人口将达到 63 亿<sup>[16]</sup>,推测会造成传染性负担增加和危险因素的改变。本研究提示,城市化和常住外来人口增加可能是北京市肺结核报告发病率下降缓慢的重要原因。本研究对我国北京市、上海市和天津市等大城市以及正在快速城市化进程地区的结核病精准防控具有重要意义。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

## 参 考 文 献

- [1] 孙闪华,高志东,赵飞,等.北京市 2005-2015 年肺结核发病时空特征分析[J].中华流行病学杂志,2018,39(6):816-820. DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2018.06.023. Sun SH, Gao ZD, Zhao F, et al. Spatial-temporal analysis on pulmonary tuberculosis in Beijing during 2005-2015[J]. Chin J Epidemiol, 2018, 39(6):816-820. DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2018.06.023.
- [2] 陈伟,夏憎憎,李涛,等.2015 年全球及中国结核病疫情形势分析[J].结核病与肺部健康杂志,2016,5(1):32-36. DOI:10.3969/j.issn.2095-3755.2016.01.010. Chen W, Xia YY, Li T, et al. Analysis for the Global and China TB epidemic situation in 2015[J]. J Tuberc Lung Health, 2016, 5(1):32-36. DOI:10.3969/j.issn.2095-3755.2016.01.010.
- [3] Shrestha S, Hill AN, Marks SM, et al. Comparing drivers and dynamics of tuberculosis in California, Florida, New York, and Texas[J]. Am J Respir Crit Care Med, 2017, 196(8):1050-1059. DOI:10.1164/rccm.201702-0377OC.
- [4] Jia ZW, Jia XW, Liu YX, et al. Spatial analysis of tuberculosis cases in migrants and permanent residents, Beijing, 2000-2006[J]. Emerg Infect Dis, 2008, 14(9):1413-1419. DOI:10.3201/eid1409.071543.
- [5] Yang CG, Lu LP, Warren JL, et al. Internal migration and transmission dynamics of tuberculosis in Shanghai, China: an epidemiological, spatial, genomic analysis[J]. Lancet Infect Dis, 2018, 18(7):788-795. DOI:10.1016/S1473-3099(18)30218-4.
- [6] Lin HH, Wang LX, Zhang H, et al. Tuberculosis control in China: use of modelling to develop targets and policies[J]. Bull World Health Organ, 2015, 93(11):790-798. DOI:10.2471/BLT.15.154492.
- [7] 施雯慧,陈伟.结核病发病影响因素研究进展[J].中华流行病学杂志,2012,33(12):1296-1300. DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2012.12.023. Shi WH, Chen W. Progress on the research of risk factors of tuberculosis incidence[J]. Chin J Epidemiol, 2012, 33(12):1296-1300. DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2012.12.023.
- [8] Tian HY, Hu SX, Cazelles B, et al. Urbanization prolongs hantavirus epidemics in cities[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2018, 115(18):4707-4712. DOI:10.1073/pnas.1712767115.
- [9] 北京市统计局.北京统计年鉴-2019[M].北京:中国统计出版社,2019. Beijing Statistics Bureau. Beijing statistical yearbook 2019[M]. Beijing:China Statistics Press, 2019.
- [10] Souza WV, Carvalho MS, Albuquerque MDFPM, et al. Tuberculosis in intra-urban settings: A Bayesian approach [J]. Trop Med Int Health, 2007, 12(3):323-330. DOI:10.1111/j.1365-3156.2006.01797.x.
- [11] Best N, Richardson S, Thomson A. A comparison of Bayesian spatial models for disease mapping[J]. Stat Methods Med Res, 2005, 14(1):35-59. DOI:10.1191/0962280205 sm388oa.
- [12] 北京市统计局.北京市人口普查资料[M].北京:中国统计出版社,2010. Beijing Statistics Bureau. Tabulation on the population census of Beijing municipality[M]. Beijing:China Statistics Press, 2010.
- [13] Getis A, Ord JK. The analysis of spatial association by use of distance statistics[J]. Geogr Anal, 1992, 24(3):189-206. DOI:10.1111/j.1538-4632.1992.tb00261.x.
- [14] Kim H, Sun DC, Tsutakawa RK. A bivariate bayes method for improving the estimates of mortality rates with a twofold conditional autoregressive model[J]. J Am Stat Assoc, 2001, 96(456):1506-1521. DOI:10.1198/016214501753382408.
- [15] 孙闪华,高志东,李亚敏,等.2005-2014 年北京市肺结核流行特征分析[J].公共卫生与预防医学,2016,27(4):6-9. DOI:CNKI:SUN:FBYF.0.2016-04-002. Sun SH, Gao ZD, Li YM, et al. Epidemiological characteristics of pulmonary tuberculosis in Beijing (2005-2014) [J]. J Public Health Prev Med, 2016, 27(4):6-9. DOI:CNKI:SUN:FBYF.0.2016-04-002.
- [16] The Population Division of the United Nations Department of Economic and Social Affairs (UN DESA). 2018 Revision of world urbanization prospects[EB/OL]. (2018-05-16) [2020-12-30]. <https://www.un.org/en/node/89767>.