

上海市 2013–2020 年肺结核病例时空特征及影响因素分析

王雅婷¹ 朋文佳¹ 苏华林² 饶立歆³ 王伟炳¹ 沈鑫³

¹复旦大学公共卫生学院流行病学教研室/公共卫生安全教育部重点实验室,上海 200032;²上海市闵行区疾病预防控制中心,上海 201101;³上海市疾病预防控制中心,上海 200336

通信作者:沈鑫,Email: shenxin@scdc.sh.cn;王伟炳,Email: wwb@fudan.edu.cn

【摘要】 目的 利用时空分布模型和集成嵌套拉普拉斯近似算法研究上海市肺结核的时空特征及其影响因素,为区域性肺结核疫情防控措施的制定提供理论依据。方法 基于中国疾病预防控制中心信息系统结核病管理信息系统下载的 2013–2020 年上海市户籍肺结核病例,采用层次贝叶斯模型对肺结核病例数据进行拟合,识别肺结核的时空变化特征,从时空角度,评估肺结核发病风险与人口、经济、卫生服务等因素的关系。结果 2013–2020 年,上海市共报告肺结核病例 29 281 例,年均报告发病率为 25.224/10 万。2013–2020 年的发病率呈先上升后下降的趋势,2014 年的报告发病率最高(27.991/10 万)。上海市肺结核的发生具有空间聚集性,通过肺结核报告发病率的热点分析和风险分析发现,上海市肺结核的高风险区域为郊区,低风险区域为中心城区。肺结核的发病风险与地区人均生产总值($RR=0.48$)、每万人医疗机构床位数($RR=0.56$)、归一化植被指数($RR=0.50$)、夜间灯光指数($RR=0.80$)有关。结论 在上海市中心城区肺结核防控工作的稳步推进下,需要格外关注郊区的防控。在后续的研究中,应进一步探索肺结核发病与归一化植被指数和夜间灯光指数之间的联系。

【关键词】 结核,肺; 层次贝叶斯模型; 时空特征; 影响因素

Spatial-temporal characteristics and influencing factors of pulmonary tuberculosis cases in Shanghai from 2013 to 2020

Wang Yating¹, Peng Wenjia¹, Su Hualin², Rao Lixin³, Wang Weibing¹, Shen Xin³

¹Department of Epidemiology, Key Laboratory of Public Health Safety of Ministry of Education, School of Public Health, Fudan University, Shanghai 200032, China; ²Minhang District Center for Disease Control and Prevention of Shanghai, Shanghai 201101, China; ³Shanghai Center for Disease Control and Prevention, Shanghai 200336, China

Corresponding authors: Shen Xin, Email: shenxin@scdc.sh.cn; Wang Weibing, Email: wwb@fudan.edu.cn

【Abstract】 Objective To use the spatiotemporal distribution model and INLA algorithm to study the spatiotemporal characteristics and influencing factors of tuberculosis in Shanghai and to provide a theoretical basis for formulating regional tuberculosis epidemic prevention and control measures. **Methods** Based on the data of registered pulmonary tuberculosis cases in Shanghai during 2013–2020 derived from the tuberculosis management information system of China Disease Control and Prevention Information System, the hierarchical Bayesian model was adopted to fit the tuberculosis case data, identify the spatiotemporal variation characteristics of tuberculosis, and explore the potential socioeconomic characteristics and other factors related to health services and spatiotemporal characteristics. **Results** From 2013 to 2020, 29 281 registered tuberculosis cases were reported in Shanghai, with an average annual incidence of 25.224/100 000. From 2013 to

DOI: 10.3760/cma.j.cn112338-20221128-01006

收稿日期 2022-11-28 本文编辑 斗智

引用格式:王雅婷,朋文佳,苏华林,等.上海市 2013–2020 年肺结核病例时空特征及影响因素分析[J].中华流行病学杂志,2023,44(8):1231–1236. DOI: 10.3760/cma.j.cn112338-20221128-01006.

Wang YT, Peng WJ, Su HL, et al. Spatial-temporal characteristics and influencing factors of pulmonary tuberculosis cases in Shanghai from 2013 to 2020[J]. Chin J Epidemiol, 2023, 44(8): 1231–1236. DOI: 10.3760/cma.j.cn112338-20221128-01006.



2020, the incidence trend increased first and then decreased, the highest incidence was reported in 2014 (27.991/100 000). The incidence of tuberculosis in Shanghai is characterized by spatial clustering. Through the spatial characteristics and risk analysis of the reported incidence of tuberculosis, it is found that the high-risk area of tuberculosis in Shanghai is the suburban communities, whereas downtown communities are the low-risk areas. The incidence risk of pulmonary tuberculosis is associated with the gross domestic product per capita ($RR=0.48$), the number of beds per 10 000 persons ($RR=0.56$), the normalized vegetation index ($RR=0.50$), and the night light index ($RR=0.80$). **Conclusions** With the steady progress of tuberculosis prevention and control in the central urban area of Shanghai, special attention should be paid to the prevention and control in the suburbs further to improve the social and economic level in the suburbs and increase the coverage rate of urban green space, to reduce the incidence of tuberculosis and reduce the disease burden of tuberculosis in Shanghai.

【Key words】 Tuberculosis, pulmonary; Bayesian hierarchical modeling; Spatial-temporal characteristics; Influencing factors

从群体角度来看,肺结核主要受社会、经济、人口、卫生服务等因素影响,这些因素会影响整个地区肺结核的传播和流行^[1-5]。传统的分析方法,仅从时间、空间或时空角度分析肺结核发病的影响因素,无法同时反映影响因素和时空效应对发病的影响。层次贝叶斯模型是一种空间流行病学方法,能够弥补传统分析方法的不足,很好地拟合影响因素和时空随机效应,通过层次模型的建立,可以避免参数过多导致的过拟合问题,使模型计算得到的结果更加准确^[6-7]。在“三位一体”结核病新型综合防治模式和运行管理机制下,上海市肺结核防控取得了显著成果^[8],但人口流动性大、老龄化严重、耐药肺结核的增加、合并其他疾病等都给防控带来了新挑战^[9-10],为完成结核病控制战略的目标还需要很大的努力。而上海市作为特大城市,需要有针对性地重点区域和时段进行科学防控^[11]。了解近年来上海市肺结核发生的时空特征、变化规律和影响因素,对进一步调整结核病控制战略提供科学依据至关重要。因此,本研究利用层次贝叶斯模型,从时空角度分析上海市肺结核的影响因素。最新研究表明,归一化植被指数与肺结核发病和死亡有关^[12-14],夜间灯光指数与肺结核患者的死亡风险有关^[13]。本研究将归一化植被指数和夜间灯光指数作为可能的影响因素纳入研究,从时空角度探讨其与肺结核之间的关系,为将集成嵌套拉普拉斯近似算法应用于空间流行病学提供理论依据,为制定上海市肺结核区域化防控策略提供依据。

资料与方法

1. 资料来源:上海市户籍的肺结核病例来自中国疾病预防控制中心结核病管理信息系统。肺结核个案数据包括性别、年龄、职业、户籍、住址、

诊断结果、诊断分型、登记日期、确诊日期等信息。经济、人口和卫生服务数据来自于上海市统计局(<https://tjj.sh.gov.cn/index.html>)和上海市各区统计年鉴。归一化植被指数从网站(<https://landsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>)下载,通过测量近红外和红光之间的差异来量化植被,当归一化植被指数为负数时,很可能是水;指数接近1时,则可能是植被繁茂的绿地;当指数接近于0时,可能是城市化区域。夜间灯光指数从网站(<https://eogdata.mines.edu/>)下载,夜光指数在一定程度上反映城市经济水平和人口集中分布情况。地理信息系统数据来自于资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/Default.aspx>),主要包括上海市乡镇区划地图、坐标及编码等信息。

2. 研究区域:上海市下辖16个区,107个街道、106个镇和2个乡。中心城区包括浦东新区外环线以内的地区、黄浦区、徐汇区、长宁区、静安区、普陀区、虹口区和杨浦区;郊区包括浦东新区外环线以外的地区、闵行区、嘉定区、金山区、松江区、青浦区、奉贤区和崇明区。

3. 研究方法:

(1)数据预处理:归一化植被指数和夜间灯光指数为卫星数据,通过ArcGIS 10.7和R 4.1.3软件进行提取处理。通过专业知识、文献综述和经验,初步确定肺结核的可能影响因素:地区人均生产总值(元/人)、人均工业总产值(元/人)、每万人医疗机构床位数(张/万人)、每万人拥有执业(助理)医师数(人/万人)、人口密度(人/km²)、老年人口比例(%)、归一化植被指数、夜间灯光指数。由于数据单位及量纲都不一致,指标间差异较明显,易对后续建模的效果和解释产生影响,故采用指标无量纲化对数据进行预处理,剔除方差膨胀系数>10的变量或无统计学意义的变量。

(2)描述统计:通过 ArcGIS 10.7 软件,以街道/乡镇为单位构建上海市肺结核发病率的分布专题地图,通过全局空间自相关分析判断上海市肺结核发病率是否存在空间聚集性,通过热点分析判断热点地区和冷点地区,绘制热点-冷点空间效应分布图,从而探讨肺结核发病的时空分布特征。采用 Joinpoint 4.9.1.0 软件进行 Joinpoint 回归分析,计算肺结核报告发病率的年度变化百分比(APC)描述其时间变化趋势。

(3)层次贝叶斯模型:是基于贝叶斯理论,根据样本信息与先验分布,对后验分布参数作出估计的模型。主要优势在于其考虑了估计中的不确定性,以及其处理数据缺失等问题的灵活性。模型包含 3 个层次:数据分布、时空过程和参数。本研究数据分布采用泊松分布。时空过程体现在结合不同的子模型来解释时空随机效应,如内在条件自回归(conditional autoregressive, CAR)^[15]和随机游走动态模型(random walk, RW)^[16]。指定逆伽玛分布作为贝叶斯框架中所有未知方差参数的先验分布。模型采用 R 软件包“INLA”中的集成嵌套拉普拉斯近似算法进行拟合,得到参数后验估计的均值和 95%CI。研究假定肺结核发病数服从泊松分布^[17],模型分解为影响因素协变量、空间和时间的分量。本研究的影响因素协变量包括地区人均生产总值、每万人医疗机构床位数、老年人口比例、归一化植被指数和夜间灯光指数。通过计算 ρ 进一步得到风险指标 RR,来衡量疾病风险^[18]。双侧检验,检验水准 $\alpha=0.05$ 。

结 果

1. 肺结核病例流行概况:2013–2020 年上海市共报告肺结核病例 29 281 例,年均报告发病率为 25.224/10 万(表 1)。男性 20 619 例(70.42%),女性

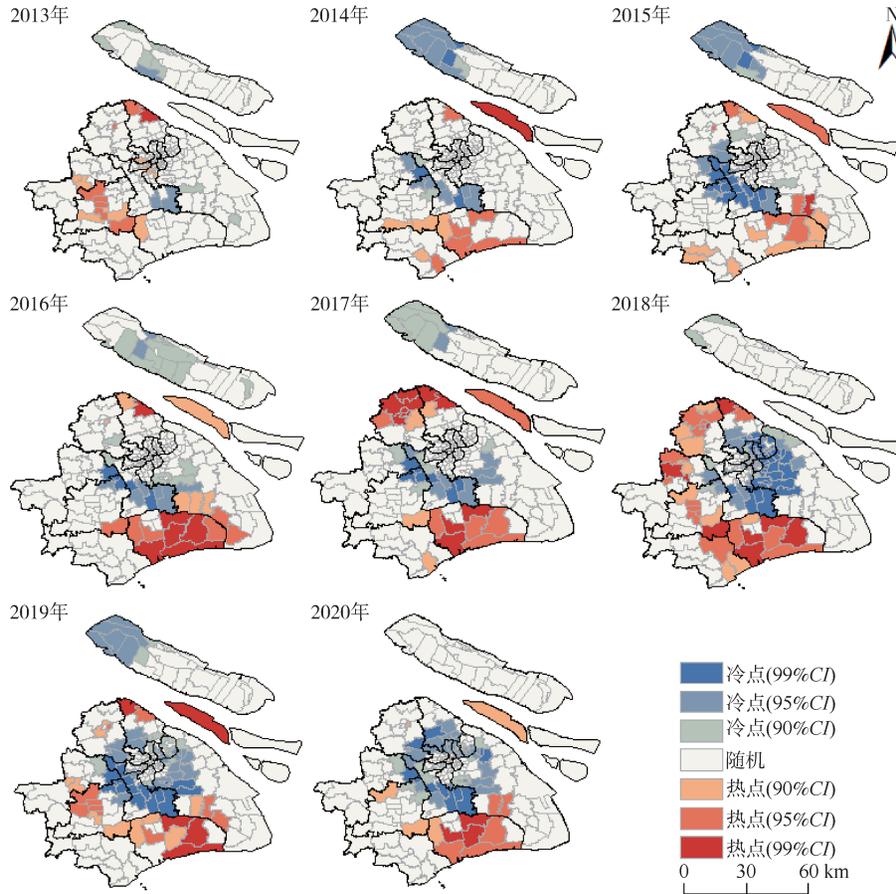
8 662 例(29.58%); ≥ 60 岁年龄组最多(13 232 例, 45.19%),0~14 岁年龄组最少(99 例,0.34%);离/退休人员人数最多(12 261 例,41.87%)。2013–2020 年的发病趋势呈先上升后下降的趋势,2014 年达到最高(27.991/10 万)(表 1),经 Joinpoint 回归分析结果显示,2014–2020 年的 APC 为 -3.5% (95%CI: -4.9%~-2.1%)呈下降趋势($P=0.001$)。上海市肺结核报告发病率最高为宝山区(35.697/10 万),发病率较低为长宁区(15.589/10 万)和徐汇区(16.220/10 万),最低为黄浦区(15.361/10 万)。

2. 肺结核病例空间自相关分析和热点分析:2013–2020 年上海市肺结核报告发病率全局空间自相关分析结果显示,全局 Moran's I 值范围为 0.12~0.27(均 $P<0.05$),表明上海市肺结核报告发病率存在明显的空间正自相关性(表 1)。热点分析结果显示,2013–2020 年上海市肺结核热点地区主要分布在周围的郊区,2013–2018 年热点地区范围呈动态扩大的趋势,2018 年热点地区范围达到最大,颜色也最深,2018–2020 年热点地区范围减小;冷点地区主要分布在上海市中心区域和崇明区部分区域,呈动态变化,尤其是中心城区的冷点地区呈扩大的趋势,2019 年的冷点地区范围达到最大,颜色也最深(图 1)。

3. 肺结核的可能影响因素:地区人均生产总值较高为黄浦区,较低为崇明区;人均工业总产值较高为嘉定区,较低为虹口区;每万人医疗机构床位数较高为黄浦区,较低为松江区;每万人拥有执业(助理)医师数较高为黄浦区,较低为松江区;人口密度较高为虹口区,较低为崇明区;老年人口比例较高为虹口区和黄浦区,较低为松江区;归一化植被指数较高为金山区,较低为黄浦区;夜间灯光指数较高为黄浦区,较低为崇明区。见表 2。对可能影响因素进行无量纲化处理,剔除存在多重共线性或无统计学意义的变量,采用层次贝叶斯模型和集

表 1 2013–2020 年上海市肺结核报告病例数和报告发病率及全局空间自相关分析

年份	报告病例数	人口数(万人)	报告发病率(/10 万)	Moran's I 值	s 值	Z 值	P 值
2013	3 864	1 432.34	26.977	0.19	0.002	4.59	<0.001
2014	4 027	1 438.69	27.991	0.12	0.002	3.04	0.002
2015	3 812	1 442.97	26.418	0.17	0.002	4.30	0.002
2016	3 726	1 450.00	25.697	0.13	0.002	3.28	0.001
2017	3 651	1 455.13	25.091	0.24	0.002	5.86	<0.001
2018	3 597	1 462.38	24.597	0.27	0.002	6.66	<0.001
2019	3 511	1 469.30	23.896	0.23	0.002	5.60	<0.001
2020	3 093	1 457.63	21.219	0.15	0.002	3.86	<0.001
合计	29 281	11 608.44	25.224	0.31	0.002	8.00	<0.001



注:审图号:沪S(2022)64号

图1 2013-2020年上海市肺结核报告发病率热点-冷点空间效应分布

表2 2013-2020年上海市肺结核的可能影响因素年均值

地区	地区人均生产总值(元/人)	人均工业总产值(元/人)	每万人医疗机构床位数(张/万人)	每万人拥有执业(助理)医师数(人/万人)	人口密度(人/km ²)	老年人口比例(%)	归一化植被指数	夜间灯光指数
宝山区	59 090.28	99 998.79	39.98	16.67	7 583.00	0.32	0.32	27.17
崇明区	46 927.03	53 886.95	47.38	26.20	579.88	0.34	0.45	1.50
奉贤区	75 606.63	143 495.22	44.34	18.70	1 683.38	0.30	0.40	9.81
虹口区	108 255.93	8 116.21	92.51	46.43	34 300.63	0.36	0.28	34.31
黄浦区	312 143.00	12 886.10	183.87	109.29	32 418.75	0.36	0.21	53.21
嘉定区	126 590.84	337 934.85	31.83	19.11	3 465.13	0.32	0.36	24.64
金山区	111 320.33	237 217.98	53.64	26.47	1 368.13	0.30	0.46	6.81
静安区	164 831.85	14 030.70	125.31	61.30	28 812.13	0.35	0.26	42.83
闵行区	84 434.94	130 961.89	38.02	17.97	6 888.13	0.29	0.34	28.51
浦东新区	182 878.54	175 692.63	34.26	18.83	4 561.25	0.29	0.35	32.09
普陀区	72 831.38	13 425.78	54.75	26.38	23 361.88	0.35	0.29	40.91
青浦区	80 408.71	128 071.18	30.56	16.14	1 820.25	0.29	0.41	15.46
松江区	66 225.58	209 157.47	27.36	14.20	2 808.13	0.27	0.40	20.64
徐汇区	263 144.74	55 048.25	143.16	72.15	20 068.50	0.32	0.28	38.40
杨浦区	134 394.74	87 787.83	78.20	33.97	21 506.25	0.33	0.28	33.17
长宁区	179 394.58	15 984.44	87.55	52.42	18 142.63	0.34	0.31	44.35

成嵌套拉普拉斯近似算法分析显示,随着地区人均生产总值($RR=0.48$)、每万人医疗机构床位数($RR=0.56$)、归一化植被指数($RR=0.50$)、夜间灯光指数($RR=0.80$)的增加,肺结核的发病风险降低,而老年人口比例对肺结核发病的影响无统计学意义(表3)。

2013-2020年上海市宝山区和奉贤区的发病

风险一直较高,长宁区、徐汇区、静安区、普陀区、黄浦区和虹口区的发病风险较低(图2)。以2020年为例, RR 值 <1.00 的区有黄浦区($RR=0.68$)、虹口区($RR=0.72$)、静安区($RR=0.77$)、长宁区($RR=0.81$)、徐汇区($RR=0.85$)、普陀区($RR=0.88$)、杨浦区($RR=0.92$)、浦东新区($RR=0.97$),除浦东新区外环线以

表 3 所选协变量的 RR 值和后验估计参数的统计

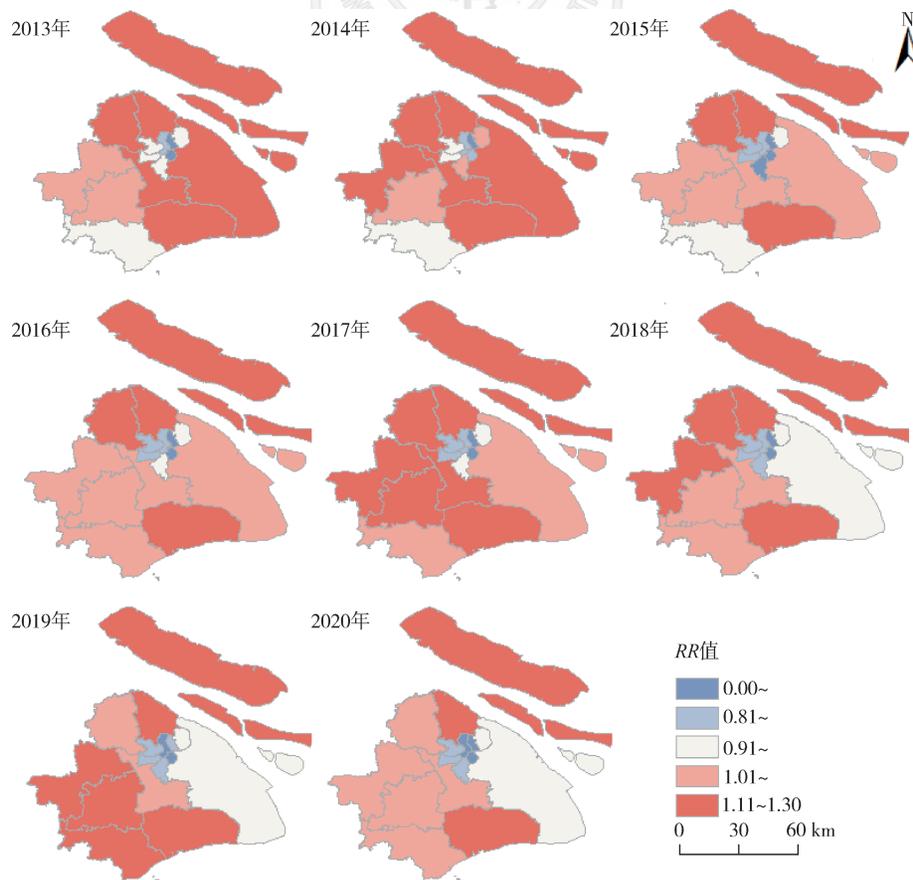
变 量	均值	95%CI 下限	95%CI 上限	标准差	RR 值
地区人均生产总值	-0.729	-0.890	-0.572	0.081	0.48
每万人医疗机构床位数	-0.587	-0.670	-0.505	0.042	0.56
老年人口比例	0.047	-0.024	0.117	0.036	1.05
归一化植被指数	-0.686	-0.844	-0.529	0.080	0.50
夜间灯光指数	-0.249	-0.368	-0.129	0.061	0.80

外的地区,以上地区均属于上海市中心城区;
RR 值>1.00 的区有闵行区(RR=1.06)、松江区(RR=1.07)、嘉定区(RR=1.07)、金山区(RR=1.08)、青浦区(RR=1.10)、宝山区(RR=1.12)、崇明区(RR=1.14)、奉贤区(RR=1.17),均属于郊区。

讨 论

本研究发现,上海市肺结核报告发病率呈下降趋势,从 2014 年的 27.991/10 万下降到 2020 年的 21.219/10 万,APC 为-3.5%(95%CI:-4.9%~-2.1%)呈下降趋势,与其他省(市)和全国的研究一致^[19-21]。通过空间自相关分析,发现上海市肺结核报告发病率分布呈空间正自相关性,表明存在空间

聚集性,与已有研究结果一致^[20-22]。热点分析结果发现,上海市肺结核热点地区主要分布在郊区,冷点地区主要分布在中心城区,热点和冷点地区随时间呈动态变化,2013-2018 年热点地区范围呈动态扩大的趋势,2018 年热点地区范围达到最大,颜色也最深,2018-2020 年热点地区范围减小;2013-2019 年中心城区的冷点地区呈扩大的趋势,2019 年的冷点地区范围达到最大,颜色也最深。通过肺结核报告发病率热点分析和风险分析发现上海市肺结核的高风险区域为郊区,低风险区域为中心城区。相比于城区人群,郊区人群的人均收入和认知水平均较低,因居住环境较差而接触到肺结核传染源的风险较高^[21,23]。因此,在上海市中心城区肺结核防控措施的稳步推进下,提示要格外



注:审图号:沪S(2021)082号

图 2 2013-2020 年上海市肺结核病例时空相互作用分量的后验均值 RR 图

关注郊区的防控。

层次贝叶斯模型结合了时间、空间效应,考虑了先验效应和样本信息,从生态层面对疾病的发病风险和人口、经济、卫生服务等影响因素估计更准确。模型研究结果发现,地区人均生产总值($RR=0.48$)、每万人医疗机构床位数($RR=0.56$)是肺结核的保护因素,与以往研究结果一致,进一步支持了以往研究的可靠性。经济水平较高的地区,肺结核的发病率较低^[21,23],医疗机构床位数相对较多的地区,医疗卫生资源更充足,更有助于控制肺结核的传播^[24]。但研究尚未发现老年人口比例对肺结核发病的影响有统计学意义,这可能是由于上海市中心城区虽然老年人口比例较高,但经济水平也较高、卫生资源也更充足,有助于控制肺结核的传播,这些影响因素之间可能存在交互效应,需要进一步研究探索。

本研究发现,归一化植被指数($RR=0.50$)和夜间灯光指数($RR=0.80$)是肺结核的保护因素。之前已有研究发现归一化植被指数与肺结核发病和死亡有关^[12-14],夜间灯光指数与肺结核患者的死亡风险有关^[13],但尚无研究发现这两个因素与肺结核的发病风险有关,本研究从时空角度发现归一化植被指数和夜间灯光指数与肺结核发病的关系,为后续的研究分析提供了更多思考的方向,提示进一步探索肺结核发病与归一化植被指数和夜间灯光指数之间的联系。

本研究存在局限性。研究中仅收集了上海市区级户籍人口数据,没有 2013-2018 年长宁区、2013-2019 年普陀区和 2016-2020 年嘉定区的街道或乡镇级别的户籍人口数据,分析尺度不够精细。

综上所述,上海市肺结核报告发病率存在空间聚集性,高风险区域为郊区,在上海市中心城区肺结核防控工作的稳步推进下,需要格外关注郊区的防控。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

作者贡献声明 王雅婷:数据收集、整理分析、论文撰写与修改;朋文佳:数据收集和提取;苏华林、沈鑫:文章审阅、经费支持;饶立敏:数据获取;王伟炳:文章审阅

参 考 文 献

- [1] Pedrazzoli D, Boccia D, Dodd PJ, et al. Modelling the social and structural determinants of tuberculosis: opportunities and challenges[J]. *Int J Tuberc Lung Dis*, 2017, 21(9):957-964. DOI:10.5588/ijtld.16.0906.
- [2] Nezenega ZS, Perimal-Lewis L, Maeder AJ. Factors influencing patient adherence to tuberculosis treatment in ethiopia: a literature review[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2020, 17(15):5626. DOI:10.3390/ijerph17155626.
- [3] 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.

- [4] Li SJ, Li YF, Song WM, et al. Population aging and trends of pulmonary tuberculosis incidence in the elderly[J]. *BMC Infect Dis*, 2021, 21(1): 302. DOI: 10.1186/s12879-021-05994-z.
- [5] Basham CA, Elias B, Fanning A, et al. Performance measurement of a Canadian provincial tuberculosis programme: Manitoba, 2008-2012[J]. *Int J Tuberc Lung Dis*, 2018, 22(4):437-443. DOI:10.5588/ijtld.17.0508.
- [6] Wang YJ, Lai YS, Du ZC, et al. Spatiotemporal distribution of hand, foot, and mouth disease in Guangdong province, China and potential predictors, 2009-2012[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2019, 16(7): 1191. DOI: 10.3390/ijerph16071191.
- [7] 刘富强. 湖北省肺结核发病时空分布特征及预测研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020. DOI: 10.27157/d.cnki.ghzku.2020.001218.
- [8] Liu FQ. Spatio-temporal analysis and prediction for pulmonary tuberculosis in Hubei province, China[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020. DOI:10.27157/d.cnki.ghzku.2020.001218.
- [9] Yu SG, Ma JQ, Jia ZW. Estimating the incidence of tuberculosis-Shanghai, China, 2025-2050[J]. *China CDC Wkly*, 2020, 2(52):995-998. DOI:10.46234/ccdcw2020.266.
- [10] Li YY, Guo JT, Xia T, et al. Incidence of pulmonary tuberculosis in Chinese adults with type 2 diabetes: a retrospective cohort study in Shanghai[J]. *Sci Rep*, 2020, 10(1):8578. DOI:10.1038/s41598-020-65603-y.
- [11] Shen X, Xia Z, Li XQ, et al. Tuberculosis in an urban area in China: differences between urban migrants and local residents[J]. *PLoS One*, 2012, 7(11):e51133. DOI:10.1371/journal.pone.0051133.
- [12] 国务院办公厅. 关于印发“十三五”全国结核病防治规划的通知[EB/OL]. (2017-02-16) [2022-11-01]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-02/16/content_5168491.htm.
- [13] Zhu S, Wu Y, Wang Q, et al. Long-term exposure to ambient air pollution and greenness in relation to pulmonary tuberculosis in China: a nationwide modelling study[J]. *Environ Res*, 2022, 214(Pt 3): 114100. DOI: 10.1016/j.envres.2022.114100.
- [14] Ge EJ, Gao JH, Ren ZP, et al. Greenness exposure and all-cause mortality during multi-drug resistant tuberculosis treatment: a population-based cohort study [J]. *Sci Total Environ*, 2021, 771:145422. DOI:10.1016/j.scitotenv.2021.145422.
- [15] Ge EJ, Gao JH, Wei XL, et al. Effect modification of greenness on $PM_{2.5}$ associated all-cause mortality in a multidrug-resistant tuberculosis cohort[J]. *Thorax*, 2022, 77(12):1202-1209. DOI:10.1136/thoraxjnl-2020-216819.
- [16] Besag J. Spatial interaction and the statistical analysis of lattice systems[J]. *J Roy Stat Soc: Ser B (Methodol)*, 1974, 36(2):192-225. DOI:10.1111/j.2517-6161.1974.tb00999.x.
- [17] Rue H, Held L. Gaussian Markov random fields: theory and applications[M]. Boca Raton: CRC Press, 2005:95.
- [18] Knorr-Held L, Raßer G. Bayesian detection of clusters and discontinuities in disease maps[J]. *Biometrics*, 2000, 56(1):13-21. DOI:10.1111/j.0006-341x.2000.00013.x.
- [19] Zhang J, Yu KF. What's the relative risk? A method of correcting the odds ratio in cohort studies of common outcomes[J]. *JAMA*, 1998, 280(19): 1690-1691. DOI: 10.1001/jama.280.19.1690.
- [20] Ding PP, Li XW, Jia ZW, et al. Multidrug-resistant tuberculosis (MDR-TB) disease burden in China: a systematic review and spatio-temporal analysis[J]. *BMC Infect Dis*, 2017, 17(1): 57. DOI: 10.1186/s12879-016-2151-5.
- [21] Yu Y, Wu B, Wu CG, et al. Spatial-temporal analysis of tuberculosis in Chongqing, China 2011-2018[J]. *BMC Infect Dis*, 2020, 20(1): 531. DOI: 10.1186/s12879-020-05249-3.
- [22] Xia L, Zhu S, Chen C, et al. Spatio-temporal analysis of socio-economic characteristics for pulmonary tuberculosis in Sichuan province of China, 2006-2015[J]. *BMC Infect Dis*, 2020, 20(1): 433. DOI: 10.1186/s12879-020-05150-z.
- [23] He WC, Ju K, Gao YM, et al. Spatial inequality, characteristics of internal migration, and pulmonary tuberculosis in China, 2011-2017: a spatial analysis[J]. *Infect Dis Poverty*, 2020, 9(1):159. DOI:10.1186/s40249-020-00778-0.
- [24] Najafizada M, Rahman A, Taufique Q, et al. Social determinants of multidrug-resistant tuberculosis: a scoping review and research gaps[J]. *Indian J Tuberc*, 2021, 68(1):99-105. DOI:10.1016/j.ijtb.2020.09.016.
- [25] Chakaya J, Khan M, Ntoumi F, et al. Global tuberculosis report 2020-Reflections on the Global TB burden, treatment and prevention efforts[J]. *Int J Infect Dis*, 2021, 113 Suppl 1(Suppl 1): S7-12. DOI: 10.1016/j.ijid.2021.02.107.