DOI:10.13210/j.cnki.jhmu.20241211.001
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/46.1049.R.20241211.1617.002

2018~2022年海南岛肺结核时空聚集性分析

崔馨禄[1],陈成江[2],李卫霞[1],罗兴雄[2],孟纬纬[1],陆晶晶[1],高志东[2,3]✉,曹 莉[1]✉
(1.海南医科大学公共卫生学院,海南 海口 571199;2.海南省疾病预防控制中心,海南 海口 571129;3.北京市疾病预防控制中心,北京 100035)

[摘要] **目的**:分析2018~2022年海南岛肺结核报告发病率时空聚集性及其影响因素,探索海南岛肺结核高发的时间及地区,为科学制定结核病的防治措施提供理论依据。**方法**:在中国疾病预防控制信息系统的传染病报告信息管理系统中,下载2018~2022年海南岛肺结核报告病例数据。采用ArcGIS 10.8软件对海南岛肺结核报告发病率的时空分布绘制环形地图,进行空间自相关分析和热点分析。采用SaTScan10.1.2软件进行时空扫描分析。采用地理探测器对肺结核年均报告发病率进行分异及因子探测和交互作用探测分析。**结果**:2018~2022年海南岛肺结核报告发病率呈逐年降低趋势($\chi^2=437.00$,$P<0.001$),全岛年均报告发病率为87.39/10万。全局空间自相关分析显示,Moran's I值均大于0,但无统计学意义($Z<1.96$,$P>0.05$),呈现随机分布。局部空间自相关及热点分析显示,海南岛肺结核热点区域分布在乐东县、陵水县、万宁市、琼中县、五指山市、保亭县和三亚市。时空扫描显示肺结核报告发病率存在明显的空间聚集性,共检测到3个时空聚集区,集中在海南岛中南部地区,差异具有统计学意义($P<0.05$)。因子探测结果显示,各因子q值从高到低排序为O_3(0.703)、PM_{10}(0.543)、$PM_{2.5}$(0.396)、人均GDP(0.359)、CO(0.309)、人口密度(0.226)、SO_2(0.178)、NO_2(0.172)。交互作用探测显示O_3与人口密度的交互作用对肺结核空间分层性的解释力最高(0.894)。肺结核发病的空间分异不是由单因子决定的,更大程度取决于多因子的综合作用。**结论**:2018~2022年海南岛肺结核报告发病率存在明显的时空聚集性,分布在黎苗族地区及中南部山区。暴露于大气污染物、经济状况欠发达地区、流动人口集中地区等因素影响肺结核的发病率。提示应完善肺结核防治体系建设,加强结核病防治知识教育活动。建立流动人口数据库及信息共享平台,掌握肺结核流行态势。设立肺结核监测哨点,重点关注少数民族及流动人口集中地区,加强结核病监测力度。

[关键词] 肺结核;时空聚集性;防治;海南岛
[中图分类号] R521;R181.3 [文献标志码] A [文章编号] 2097-5953(2025)21-1601-09

Spatial-temporal clustering of tuberculosis in Hainan Island from 2018 to 2022

CUI Xinlu[1], CHEN Chengjiang[2], LI Weixia[1], LUO Xingxiong[2], MENG Weiwei[1], LU Jingjing[1], GAO Zhidong[2,3]✉, CAO Li[1]✉
(1. *School of Public Health, Hainan Medical University, Haikou* 571199, *China*; 2. *Hainan Provincial Center for Disease Control and Prevention, Haikou* 571129, *China*; 3. *Beijing Center for Disease Prevention and Control, Beijing* 100035, *China*)

[*Foundation Project*]: *This study was supported by the Key R&D Program of Hainan Province* (*ZDYF2021GXJS018*)
[*Author*]: *CUI Xinlu, E-mail: CXL@hainmc.edu.cn.*
[*Correspondence to*]: *CAO Li, Ph.D., Professor, E-mail: caoli@hainmc.edu.cn; GAO Zhidong, Ph.D., Associate Chief Physician, E-mail: guhu751029@126.com.*
Received: 2024-08-11 *Revised*: 2024-11-13 *JHMU*, 2025;31(21):1601-1609

View from specialist: It is creative, and of certain scientific and educational value.

[Abstract] **Objective**: To analyze the spatial-temporal clustering and influencing factors of reported incidence of tuberculosis (TB) in Hainan Island from 2018 to 2022, explore the high-risk time and areas of TB in Hainan Island, and provide theoretical ba-

[基金项目] 海南省重点研发计划项目(ZDYF2021GXJS018)
[作者简介] 崔馨禄,E-mail:CXL@hainmc.edu.cn。
[通讯作者] 曹莉,博士,教授,E-mail:caoli@hainmc.edu.cn;高志东,博士,副主任医师,E-mail:guhu751029@126.com。
[收稿日期] 2024-08-11 [修回日期] 2024-11-13 网络出版时间:2024-12-11 16:51:42

sis for scientific prevention and control measures of TB. **Methods**: From the Infectious Disease Reporting Information Management System of China Disease Prevention and Control Information System, the data of reported cases of TB in Hainan Island from 2018 to 2022 were downloaded. ArcGIS 10.8 software was used to draw the ring map of the spatial-temporal distribution of TB in Hainan Island, and spatial autocorrelation analysis and hot spot analysis were conducted. Software SaTScan10.1.2 was used for spatial-temporal scan analysis. Factor detection and interaction detection were used to analyze the annual reported incidence of TB by geographical detector. **Results**: The reported incidence of TB in Hainan Island showed a downward trend from 2018 to 2022 (χ^2=437.00, P<0.001), and the average annual reported incidence rate was 87.39/100 000. Global spatial autocorrelation analysis showed that the Moran′s I values were greater than 0, but it was not statistically significant (Z<1.96, P>0.05), which showed a random distribution. Local spatial autocorrelation and hot spot analysis showed that the hot spots of TB in Hainan Island were distributed in Ledong, Lingshui, Wanning, Qiongzhong, Wuzhishan, Baoting, and Sanya. Spatial and temporal scanning showed that there were obvious spatial clustering areas of reported incidence of TB, and 3 spatial-temporal clustering areas were detected, with statistical significance (P<0.05), which were concentrated in the central and southern areas of Hainan Island. The results of factor detection showed that the q value of each factor from high to low was O_3 (0.703), PM_{10} (0.543), $PM_{2.5}$ (0.396), per capita GDP (0.359), CO (0.309), population density (0.226), SO_2 (0.178), NO_2 (0.172). The interaction between O_3 and population density had the highest explanatory power (0.894) on the spatial stratification of TB. The spatial variation of TB incidence was not determined by a single factor, but depended more on the comprehensive effect of multiple factors. **Conclusion**: The reported incidence of TB in Hainan Island from 2018 to 2022 has an obvious spatial-temporal clustering, which is distributed in Li and Miao ethnic areas and the central and southern mountainous areas. Exposure to air pollutants, less developed areas, and concentrated floating population affect the incidence of TB. The construction of TB prevention and control system should be improved, and the education activities of TB prevention and control knowledge should be strengthened. It is necessary to establish a database and information sharing platform for floating population to grasp the epidemic situation of TB. In order to strengthen TB surveillance, TB surveillance sentinel sites should be set up, focusing on the minority and floating population concentrated areas.

[**Key words**] Tuberculosis; Spatial-temporal clustering; Prevention and control; Hainan Island

肺结核(tuberculosis,TB)是由结核分枝杆菌感染肺部引起的慢性呼吸道传染病[1,2]。2008～2018年中国肺结核年报发病率呈逐年下降趋势,但肺结核仍是我国乃至世界高发病率的呼吸道传染病之一[3]。海南岛结核病发病率一直居全国前五位[4],是影响海南自由贸易港建设的公共卫生安全问题。时空聚集性研究可以通过分析疾病在时空上的分布特点和规律,找出疾病高发时间段和高发区[5],帮助解决传统流行病学无法分析传染病在相邻地区相互影响的问题[6]。本研究采用空间自相关分析、热点分析、时空扫描分析及地理探测器方法,对2018～2022年海南岛肺结核发病率进行时空聚集性及影响因素分析,为海南岛在空间上科学制定结核病的防治措施提供理论依据。

1 资料与方法

1.1 资料来源

于中国疾病预防控制信息系统的传染病报告信息管理系统,下载发病日期为2018年1月1日～2022年12月31日的现住址为海南省所有的肺结核病例个案数据,包括患者现住址、疾病诊断、病例分类等信息。剔除报告里显示为疑似病例及其他疾病的患者,根据病例现住址,以18个市(县)为单位(不含三沙市),整理、汇总各年度肺结核报告发病数。常住人口数据来源于中国疾病预防控制信息系统的基本信息系统。于《海南省统计年鉴》获取海南省各市县PM_{10}、$PM_{2.5}$、SO_2、NO_2、CO、O_3、人均国内生产总值(gross domestic product,GDP)和人口密度等数据。于国家地理信息公共服务平台获取海南省地图。

1.2 统计分析

采用Microsoft Excel 2021软件建立海南岛2018～2022年肺结核报告病例数据库,对数据进行整理、分类及汇总,根据肺结核报告发病数和常住人口数计算肺结核报告发病率及年均报告发病率[7]。肺结核报告发病率是指在一定期间内,某一地区,所有医疗卫生机构报告的肺结核患者数占该地区人口的比率[8]。肺结核年均报告发病率是指在一定的时间范围内,肺结核在人群中平均每年的发病数与该人群总人数之比。采用SPSS 26.0软件对海南岛肺结核年报告发病率进行线性趋势卡方检验。使用ArcGIS 10.8软件绘制海南岛肺结核年均报告发病率和年报告发病率环形地图,并进行空间自相关分析和热点分析。采用SaTScan 10.1.2软件进行时空扫描分析,采用R 4.2.3软件进行地理探测器分析。

1.3 研究方法

1.3.1 空间自相关分析 全局空间自相关分析可以反映整个海南岛肺结核的空间分布是否具有相

关性，局部空间自相关分析可以分析肺结核发病局部地区与其邻近地区是否存在聚集，Local Indicators of Spatial Association（LISA）集聚图以“高高”、“高低”、“低高”和“低低”聚集4种模式显示。“高高”聚集表示该地区肺结核发病率高，其邻近地区肺结核发病率也高；“低高”聚集表示该地区肺结核发病率低，但其邻近地区发病率高。

1.3.2 热点分析 热点分析可以分析海南岛肺结核发病率的高发地区和低发地区，即热点地区和冷点地区，用Getis-Ord Gi*指数表示。当$G>0$且$P<0.05$，该地区为高值聚集区，即肺结核高发地区。

1.3.3 时空扫描分析 时空扫描可以判断海南岛肺结核发病空间聚集区域随时间变化的规律。基于Poisson模型，用SaTScan10.1.2软件对报告病例数、常住人口数、经纬度坐标进行时空扫描。设定最大空间扫描区域为人口数的50%[9]，确保所选区域具有足够的代表性以识别出潜在的聚集区域。扫描窗口以年为时间单位，最大时间扫描范围为研究周期的50%，蒙特卡罗模拟次数为999次，模拟次数越多，统计显著性越高，能够提供足够的样本量以确保结果的可靠性。利用扫描窗口内外的实际值和理论值构造对数似然比检验统计量，差异有统计学意义说明该窗口下的区域为聚集区[5]。logarithmic likelihood ratio（LLR）值越大，表明该地区是聚集区域的可能性越大[6]。一类聚集区的肺结核发病风险最大。

1.3.4 地理探测器 通过计算空间异质性来探测因变量与自变量之间空间分布格局的一致性，以此衡量自变量对因变量的解释度[10,11]，用q统计量表示，q统计量取值范围在0～1。基于海南岛肺结核年均报告发病率，采用地理探测器对PM_{10}、$PM_{2.5}$、SO_2、NO_2、CO、O_3、人口密度和人均GDP等因素进行分异及因子探测和交互作用探测分析。分异及因子探测器用q值评估各因素对肺结核空间分异的影响程度，q值越接近于1，表明该因素对肺结核空间分层异质性的解释力越强。交互作用探测器可以评估两个因素叠加作用对肺结核空间分异的解释力，两个因素之间的交互叠加作用对肺结核空间分层异质性的影响大于该因素单独作用时，交互作用类型为双因子增强或非线性增强。

2 结果

2.1 2018～2022年海南岛肺结核发病率时空分布

2018～2022年海南岛肺结核报告例数共42 227例，全岛肺结核年报告发病率依次为94.75/10万、91.02/10万、85.22/10万、84.19/10万、82.56/10万。经线性趋势检验，年报告发病率呈逐年降低趋势（$\chi^2=437.00$，$P<0.001$）。其中，陵水黎族自治县和乐东黎族自治县报告发病率均显著高于其他地区。万宁市报告发病率由2018年的69.20/10万增长到2022年的119.22/10万，呈明显上升趋势。东方市报告发病率由2018年的111.97/10万降至2022年的61.53/10万，下降显著。见表1。

2018～2022年全岛肺结核年均报告发病率为87.39/10万，18个市（县）中年均报告发病率较高的县分别为陵水黎族自治县（159.64/10万）、乐东黎族自治县（131.07/10万）、琼中黎族苗族自治县（117.87/10万）、白沙黎族自治县（111.23/10万）、五指山市（110.54/10万）和保亭黎族苗族自治县（102.05/10万），空间分布相对集中，主要在黎族苗族地区。琼海市（70.27/10万）、临高县（71.13/10万）和澄迈县（72.57/10万）年均报告发病率较低。见图1。

2.2 全局空间自相关分析

2018～2022年海南岛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指数分别为0.03、0.13、0.10、0.07和0.09（$Z<1.96$，$P>0.05$），表明全局相关性差异无统计学意义，呈现随机分布。见表2。

2.3 局部空间自相关分析

为进一步探索海南岛肺结核发病时空分布特征，进行局部空间自相关分析。LISA分析结果显示，2018～2021年“高高”聚集区集中在五指山市、保亭黎族苗族自治县，2022年集中在琼中黎族苗族自治县、万宁市，“高高”聚集区呈现出由中南部地区向东部地区扩散的趋势。2018～2022年“低低”聚集区主要集中在临高县、定安县，“低高”聚集区在三亚市。2022年保亭黎族苗族自治县转为“低高”聚集。2018～2022年均不存在“高低”聚集的区域。见图2。

2.4 冷热点分析

热点分析结果显示，2018～2022年海南岛肺结核发病热点地区有五指山市、保亭黎族苗族自治县、三亚市、陵水黎族自治县、琼中黎族苗族自治县和万宁市，主要集中在中南部地区，2021年肺结核发病热点地区由中南部地区逐渐向东部扩散。全岛冷点地区较少，主要分布在临高县、定安县。见图3。

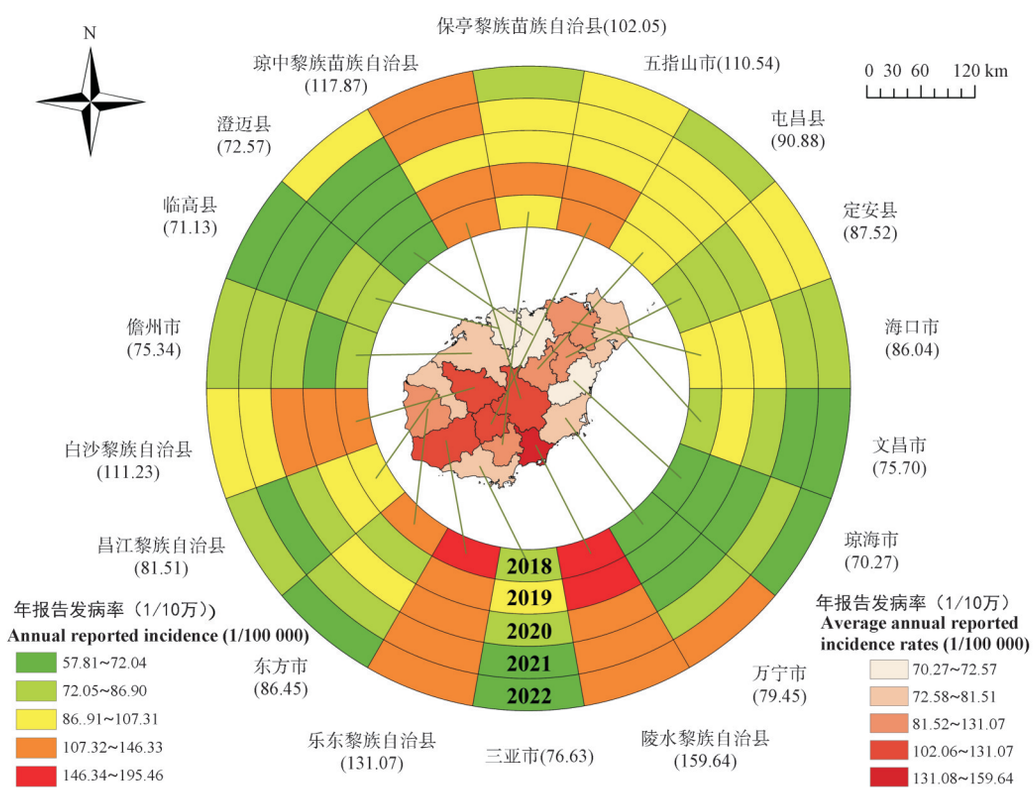
2.5 时空扫描分析

对2018～2022年海南岛肺结核报告病例数进行时空扫描，发现肺结核报告病例存在空间聚集

表 1　2018~2022 年海南岛肺结核报告发病率(1/10 万)

Tab 1　Reported incidence of tuberculosis in Hainan Island from 2018 to 2022 (1/100 000)

地区 Region	2018	2019	2020	2021	2022
陵水黎族自治县 Lingshui Li Autonomous County	188.54	195.46	146.33	136.10	137.45
乐东黎族自治县 Ledong Li Autonomous County	159.45	129.25	132.56	120.79	113.02
琼中黎族苗族自治县 Qiongzhong Li Miao Autonomous County	129.12	112.04	91.11	125.29	132.20
白沙黎族自治县 Baisha Li Autonomous County	120.58	122.53	111.24	95.93	104.83
五指山市 Wuzhishan City	114.56	142.55	88.64	104.21	103.61
东方市 Dongfang City	111.97	80.11	101.73	78.75	61.53
保亭黎族苗族自治县 Baoting Li Miao Autonomous County	107.31	117.58	105.51	101.85	78.54
海口市 Haikou City	92.69	93.65	88.79	83.46	75.27
屯昌县 Tunchang County	92.47	96.69	91.34	90.08	83.59
昌江黎族自治县 Changjiang Li Autonomous County	90.95	96.66	73.70	69.79	76.47
文昌市 Wenchang City	86.90	88.92	74.58	68.82	59.59
定安县 Dingle′an County	85.82	82.80	78.41	101.16	90.18
临高县 Lingao County	82.91	74.97	61.40	72.04	64.10
儋州市 Danzhou City	82.47	68.25	75.88	73.98	76.11
三亚市 Sanya City	78.64	92.65	78.59	71.55	66.92
澄迈县 Chengmai County	71.55	68.52	57.81	60.45	104.33
万宁市 Wanning City	69.20	59.33	65.47	85.90	119.22
琼海市 Qionghai City	66.63	64.49	69.04	80.84	69.72
海南岛 Hainan Island	94.75	91.02	85.22	84.19	82.56



标准地图审图号:琼S(2024)237号

图 1　2018～2022 年海南岛肺结核报告发病率时空分布

Fig 1　Spatial-temporal distribution of reported incidence of tuberculosis in Hainan Island from 2018 to 2022

表2　2018~2022年海南岛肺结核报告发病率全局空间自相关分析结果

Tab 2　Global spatial autocorrelation analysis of reported incidence of tuberculosis in Hainan Island from 2018 to 2022

年份	Moran's I	预期指数	方差	Z	P
2018	0.03	−0.06	0.02	0.63	0.53
2019	0.13	−0.06	0.02	1.42	0.16
2020	0.10	−0.06	0.02	1.16	0.25
2021	0.07	−0.06	0.02	0.88	0.38
2022	0.09	−0.06	0.02	1.04	0.30

性，共检测到3个时空聚集区，差异均存在统计学意义（P<0.05），见表3。一类聚集区的聚集时间在2018～2019年，共覆盖7个市县，分别为乐东黎族自治县、白沙黎族自治县、琼中黎族苗族自治县、五指山市、保亭黎族苗族自治县、三亚市、陵水黎族自治县，相对危险指数RR值为1.48，LLR值为332.74，这些地区肺结核发病风险最大；二类聚集区在海口市，聚集时间在2018～2019年；三类聚集区在澄迈县，聚集时间在2022年，相对危险指数RR值为1.20。总体上，全岛肺结核报告病例聚集区域主要分布在中南部地区，见图4。

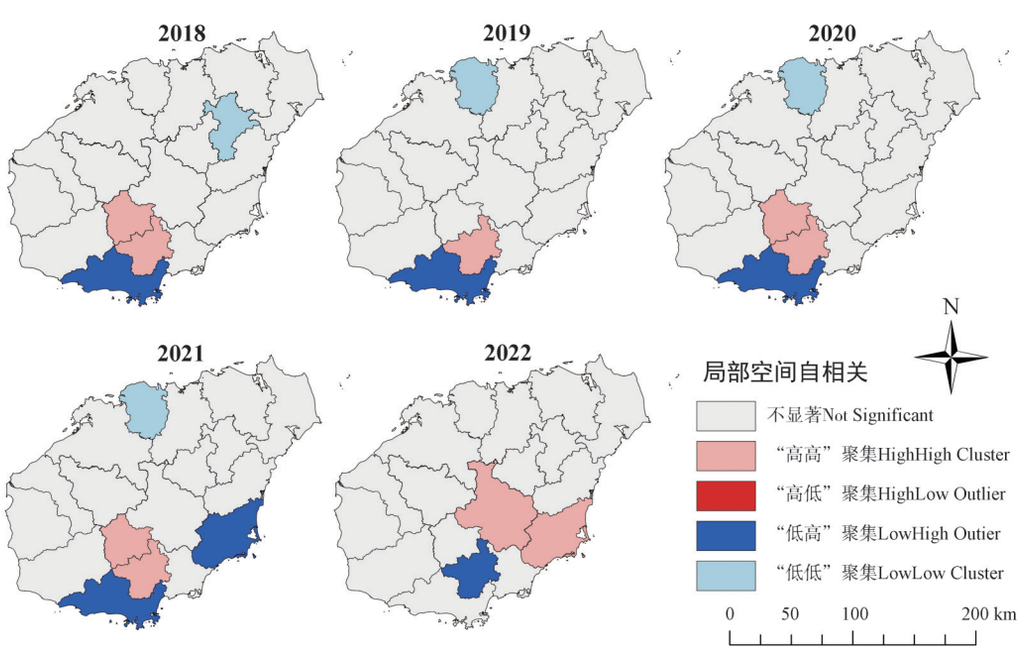
2.6　地理探测器分析

基于地理探测器分析，分异及因子探测结果显示，各因子q值从高到低排序为：O_3（0.703）＞PM_{10}（0.543）＞$PM_{2.5}$（0.396）＞人均GDP（0.359）＞CO（0.309）＞人口密度（0.226）＞SO_2（0.178）＞NO_2

表3　2018~2022年海南岛肺结核报告病例数空扫描分析

Tab 3　Spatial-temporal scanning analysis of reported tuberculosis cases in Hainan Island from 2018 to 2022

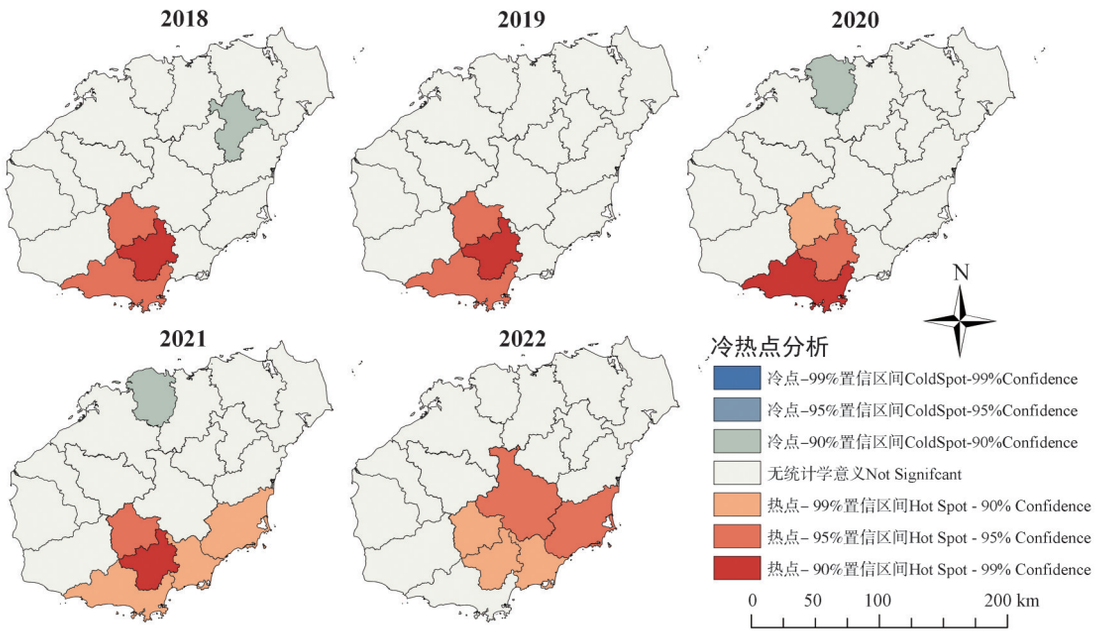
聚集类型	聚集地区	聚集时间	报告病例数	期望病例数	RR	LLR	P
一类聚集	乐东县、白沙县、琼中县、五指山市、保亭县、三亚市、陵水县	2018～2019	5 427	3 819.94	1.48	332.74	＜0.000 1
二类聚集	海口市	2018～2019	4 262	3 998.05	1.07	9.44	＜0.01
三类聚集	澄迈县	2022	521	435.97	1.20	7.89	＜0.05



标准地图审图号：琼S（2024）237号

图2　2018～2022年海南岛肺结核报告发病率局部空间自相关

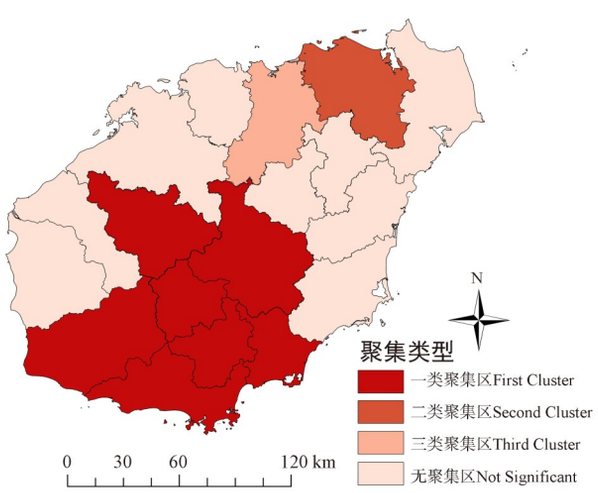
Fig 2　Local spatial autocorrelation analysis of reported incidence of tuberculosis in Hainan Island from 2018 to 2022



标准地图审图号：琼S(2024)237号

图3　2018～2022年海南岛肺结核报告发病率冷热点分析

Fig 3　Analysis of hot spots of reported incidence of tuberculosis in Hainan Island from 2018 to 2022



标准地图审图号：琼S(2024)237号

图4　2018～2022年海南岛肺结核报告病例时空扫描聚集区域

Fig 4　Spatial-temporal scanning of the clustering areas of reported tuberculosis cases in Hainan Island from 2018 to 2022

(0.172)。O_3、PM_{10}是肺结核空间分异的重要影响因子。任意两两因子交互作用探测显示，O_3与人口密度的交互作用对肺结核空间分层异质性的解释力最高(0.894)，其次是O_3与PM_{10}(0.849)，交互作用类型均为双因子增强。表明肺结核发病的空间分异不仅仅是由单因子决定的，更大程度取决于多因子的综合叠加作用。

3　讨论

本研究采用空间流行病学方法，对2018～2022年海南岛肺结核报告病例进行了时空聚集性分析。本研究发现，2018～2022年海南岛肺结核报告发病率总体呈下降趋势，全岛报告发病率由2018年的94.75/10万降至2022年的82.56/10万。2020年全岛报告病例数和发病率下降明显，与2023年世界卫生组织发布的全球结核病报告结果一致[12]，新冠疫情是影响全球结核病报告病例数大幅减少的重要因素。疫情期间人们居家时间长[13]，社会活动减少，戴口罩等防范意识提升，减少了接触病原体的机会。此外，疫情期间肺结核基本医疗服务资源被新冠肺炎占用，患者不能及时被诊断，导致肺结核报告病例数减少。

本研究中，东方市报告发病率由2018年的111.97/10万下降至2022年的61.53/10万，这可能与当地不断完善医疗服务体系，提升肺结核报告发病质量和规范诊疗质量，并为患者提供交通和营养补助等措施有关[4]。但2018～2022年陵水黎族自治县和乐东黎族自治县发病率下降缓慢，年报告发病率均显著高于其他地区，是海南岛肺结核的严重高发地区，肺结核流行态势长期严峻。这可能与少数民族山区的经济水平和医疗卫生资源的可及性相对较低[14]，公众的健康意识相对较弱等有关[15]。与

海南省历年肺结核发病特征一致[16,17]，肺结核发病聚集区主要在黎苗族地区及中南部山区。应持续重点关注少数民族山区，进一步完善肺结核防治体系建设，加强结核病防治知识健康教育，强化对患者的密切接触者、学生、农民等重点人群及耐药结核病高危人群的防治措施[18]。本研究发现全岛肺结核防控效果不均，万宁市报告发病率初期呈现较低水平，随后几年逐渐上升。万宁市与肺结核的高发地区陵水黎族自治县、琼中黎族苗族自治县相邻，增加了肺结核传播扩散的风险。除此之外，万宁还是海南岛热门的旅游胜地之一，独特的热带海洋气候吸引了大量游客，冬季北方老年人候鸟群体进岛康养。人口净迁入较高的地区肺结核传播速度显著提高[19]，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[20]。提示近年该地区及附近地区肺结核呈高发态势，应加强疫情监测及防控力度，及时发现治疗新发患者。

多项研究结果证明[21-29]，肺结核发病率和死亡率与大气污染物PM_{10}、$PM_{2.5}$、O_3、NO_2和SO_2等因素相关。本研究因子探测显示，大气污染物中O_3对海南岛肺结核空间分异的影响最大，其次为PM_{10}、$PM_{2.5}$。暴露于环境中的大气污染物会抑制肿瘤坏死因子-α和干扰素-γ免疫因子的产生[30]，削弱对抗结核分枝杆菌的免疫力，使细菌、病毒更容易侵入人体呼吸、循环等系统，增加肺结核感染和死亡的风险[31]。有研究发现，在成都市，每日PM_{10}每增加10 μg/m^3，活动性结核病累积相对风险增加6%[25]；在连云港市，每周PM_{10}每增加10 μg/m^3，累积相对风险增加11%，每周$PM_{2.5}$每增加10 μg/m^3，累积相对风险增加12%[28]。

肺结核发病率还与人口密度、流动人口的迁入迁出等社会经济因素有关[21]。交互作用探测结果发现，O_3与人口密度的交互作用最大，说明大气污染物与人口密度因素的交互作用影响海南岛肺结核的发病率。人口密度可能加剧现有的社会脆弱性，包括卫生设施不足、住房紧张、交通拥挤和卫生服务超负荷[21]。2018～2019年二级聚集区在海口市，海口作为海南省会城市，报告病例数最多，自2018年国家提出海南自由贸易港建设，人口跨地区流动大幅增加[32]，这可能导致肺结核报告病例数增多。频繁、大量的人口流动增加了肺结核传播的风险，加重了结核病防治工作负担，给结核病控制工作带来新的挑战[33]。提示应加强流动人口地区结核病监测工作，在流动人口地区采取相应的防治措施。比如建立流动人口数据库及信息共享平台，记录流动人口的健康状况和流动趋势，掌握流动人口地区肺结核流行态势。在流动人口集中地区定期开展健康筛查，设立肺结核监测哨点，早期预警，及时发现肺结核病例。继续加强结核病患者的耐药性监测[34]及高危人群耐药结核病的筛查[35]，减少肺结核传播风险。

本研究存在一定的局限性，肺结核的传播受到气象、空气质量、社会经济以及病原体本身等因素的多重影响。有研究表明湿度、降雨量、日照等气象因素是影响海南结核病风险的重要因素[36]，本研究仅分析了空气质量和社会经济对肺结核空间分布的影响，未来将结合气象、民族文化、教育水平、生活习惯等多种因素，进一步分析海南岛肺结核时空聚集性。

作者贡献度说明：

崔馨禄：数据整理分析、绘图和论文撰写；陈成江：数据收集、整理和分析；李卫霞、罗兴雄：资料收集、论文审核和修改；孟纬纬：数据分析和绘图；陆晶晶：资料收集；高志东、曹莉：选题设计、论文指导和修改。

所有作者声明不存在利益冲突关系。

参考文献

1 杨胜雄，李军，汪俊华，等. 基于空间统计学的贵阳市肺结核患者时空模式分析[J]. 疾病监测，2022，37(10)：1318-1323.
Yang SX，Li J，Wang JH，et al. Spatiotemporal pattern of pulmonary tuberculosis patients in Guiyang based on spatial statistics [J]. Dis Surveill，2022，37(10)：1318-1323.

2 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.
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.

3 Xue M，Zhong J，Gao M，et al. Analysis of spatial-temporal dynamic distribution and related factors of tuberculosis in China from 2008 to 2018[J]. Sci Rep，2023，13(1)：4974.

4 黄静静，柯芊羽，侯萍，等. 海南省2018—2022年结核分枝杆菌耐药监测分析[J]. 中国热带医学，2024，24(1)：102-106.
Huang JJ，Ke QY，Hou P，et al. Surveillance of drug resistance to *Mycobacterium tuberculosis* in Hainan province，2018-2022[J]. Chin Trop Med，2024，24(1)：102-106.

5 林静静，张铁威，李秀央．疾病时空聚集分析的研究与进展[J]．中华流行病学杂志，2020，41（7）：1165-1170.
Lin JJ，Zhang TW，Li XY. Research progress on spatiotemporal clustering of disease [J]. Chin J Epidemiol，2020，41(7)：1165-1170.

6 廖龙，陈慧娟，方世林，等．贵州省2011-2020年学生肺结核流行特征及其时空变化分析[J]．中华流行病学杂志，2023，44(6)：966-973.
Liao L，Chen HJ，Fang SL，et al. Epidemiological characteristics and spatio-temporal distribution of pulmonary tuberculosis cases reported in students from Guizhou province，2011-2020 [J]. Chin J Epidemiol，2023，44(6)：966-973.

7 黄小婵，袁薇，杨敬源，等．2010-2019年贵州省肺结核时空分布特征分析[J]．疾病监测，2022，37(4)：498-502.
Huang XC，Yuan W，Yang JY，et al. Spatiotemporal distribution of pulmonary tuberculosis in Guizhou，2010－2019[J]. Dis Surveill，2022，37(4)：498-502.

8 张慧，徐彩红，刘小秋．结核病防治规划监控与评价指标手册[M]．北京：人民卫生出版社，2020.
Zhang H，Xu CH，Liu XQ. Manual of indicators for monitoring and evaluation of tuberculosis control programmes[M]．Beijing：People′s Med Publish House，2020.

9 刘洋，高燕琳，史芸萍，等．2015—2019年北京市肺结核时空聚集性分析[J]．中华疾病控制杂志，2021，25(8)：898-904.
Liu Y，Gao YL，Shi YP，et al. Temporal-spatial clustering analysis of pulmonary tuberculosis in Beijing from 2015 to 2019[J]. Chin J Dis Control Prev，2021，25(8)：898-904.

10 王劲峰，徐成东．地理探测器：原理与展望[J]．地理学报，2017，72(1)：116-134.
Wang JF，Xu CD. Geodetector：Principle and prospective[J]. Acta Geogr Sin，2017，72(1)：116-134.

11 王晓风，张业武，马家奇．基于地理探测器的我国西南部分地区细菌性痢疾发病影响因素分析[J]．中华流行病学杂志，2019，40(8)：953-959.
Wang XF，Zhang YW，Ma JQ. Factors influencing the incidence of bacterial dysentery in parts of southwest China，using data from the geodetector [J]. Chin J Epidemiol，2019，40(8)：953-959.

12 World Health Organization. Global tuberculosis report 2023[R]. Geneva：World Health Organization，2023.

13 姚叶萍，关玉娟．2017—2020年广州市增城区肺结核病流行特征分析[J]．中国感染与化疗杂志，2022，22(3)：260-264.
Yao YP，Guan YJ. Epidemiological features of tuberculosis in Zengcheng district，Guangzhou from 2017 to 2020[J]. Chin J Infect Chemother，2022，22(3)：260-264

14 陈善颖，刘瑞，张福威，等．海南省2014—2020年398例耐多药肺结核影响因素分析[J]．中国热带医学，2023，23(8)：852-856.
Chen SY，Liu R，Zhang FW，et al. Analysis of influencing factors for multidrug-resistant pulmonary tuberculosis in Hainan province from 2014 to 2020[J]. Chin Trop Med，2023，23(8)：852-856.

15 黄静静，陈亚玲，熊昌富，等．海南省92例肺结核耐药的危险因素分析[J]．中国热带医学，2018，18(2)：125-127.
Huang JJ，Chen YL，Xiong CF，et al. Risk factors of drug resistance in 92 pulmonary tuberculosis cases in Hainan[J]. Chin Trop Med，2018，18(2)：125-127.

16 李臻，陈成江，陈玉妹．海南省2016-2018年肺结核流行病学特征[J]．中国热带医学，2021，21(10)：959-964.
Li Z，Chen CJ，Chen YM. Epidemiological characteristics of pulmonary tuberculosis in Hainan，2016-2018 [J]. Chin Trop Med，2021，21(10)：959-964.

17 林峰，罗兴雄．海南省黎族集居地初治涂阳肺结核病人队列分析[J]．中国防痨杂志，2003，25(5)：302-304..
Lin F，Luo XX. The cohort analysis of new smear positive pulmonary tuberculosis in Li Nationality collective residential regions of Hainan province[J]. Chin J Antituberc，2003，25(5)：302-304.

18 王兴斌，蒋明霞，赵昌明，等．青海省2016—2019年结核分枝杆菌耐药特征及空间聚集性[J]．中国热带医学，2023，23(8)：815-821.
Wang XB，Jiang MX，Zhao CM，et al. Drug resistance characteristics and spatial clustering of *Mycobacterium tuberculosis* in Qinghai province from 2016 to 2019[J]. Chin Trop Med，2023，23(8)：815-821.

19 曾苏粪，靳月琴．2015-2018年广东省中山市新发活动性肺结核空间聚集性分析[J]．预防医学论坛，2022，28(8)：568-571.
Zeng SL，Jin YQ. Analysis on spatial aggregation of new active tuberculosis Zhongshan city，Guagdong province，2015-2018[J]. Prev Med Trib，2022，28(8)：568-571.

20 尹金风，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.
Yin JF，Huang RW，Jiang H，et al. Spatio-temporal distribution of pulmonary tuberculosis and influencing factors in Beijing，2008-2018 [J]. Chin J Epidemiol，2021，42(7)：1240-1245.

21 Liyew AM, Clements ACA, Akalu TY, et al. Ecological-level factors associated with tuberculosis incidence and mortality: A systematic review and meta-analysis[J]. Plos Glob Pub Health, 2024, 4(10): e0003425.

22 Li H, Ge M, Zhang M. Spatio-temporal distribution of tuberculosis and the effects of environmental factors in China[J]. BMC Infect Dis, 2022, 22(1): 565.

23 Lai TC, Chiang CY, Wu CF, et al. Ambient air pollution and risk of tuberculosis: A cohort study[J]. Occup Environ Med, 2016, 73(1): 56-61.

24 吕恒梁, 张馨, 张文义, 等. 肺结核流行病学特征及影响因素研究进展[J]. 疾病监测, 2024, 39(2): 207-214.
Lv HL, Zhang X, Zhang WY, et al. Progress in research of epidemiological characteristics of pulmonary tuberculosis and influencing factors[J]. Dis Surveill, 2024, 39(2): 207-214.

25 Zhu S, Xia L, Wu J, et al. Ambient air pollutants are associated with newly diagnosed tuberculosis: A time-series study in Chengdu, China[J]. Sci Total Environ, 2018, 631-632: 47-55.

26 Saito Y, Azuma A, Kudo S, et al. Long-term inhalation of diesel exhaust affects cytokine expression in murine lung tissues: Comparison between low-and high-dose diesel exhaust exposure[J]. Exp Lung Res, 2002, 28(6): 493-506.

27 Zhu PP, Gao Y, Zhou GZ, et al. Short-term effects of high-resolution (1-km) ambient $PM_{2.5}$ and PM_{10} on hospital admission for pulmonary tuberculosis: A case-crossover study in Hainan, China[J]. Front Pub Health, 2023, 11: 1252741.

28 Li Z, Mao X, Liu Q, et al. Long-term effect of exposure to ambient air pollution on the risk of active tuberculosis[J]. Int J Infect Dis, 2019, 87: 177-184.

29 Peng Z, Liu C, Xu B, et al. Long-term exposure to ambient air pollution and mortality in a Chinese tuberculosis cohort[J]. Sci Total Environ, 2017, 580: 1483-1488.

30 Mohidem NA, Osman M, Hashim Z, et al. Association of sociodemographic and environmental factors with spatial distribution of tuberculosis cases in Gombak, Selangor, Malaysia[J]. Plos One, 2021, 16(6): e0252146.

31 徐曼. 大气污染物暴露与结核病进程相关结局的关联性研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2022.
Xu M. Associations between exposures to ambient air pollutants and outcomes related to the tuberculosis process[D]. Wu Han: Huazhong Univ Sci Technol, 2022.

32 钟山, 王正义, 郭林旺, 等. 2016—2020年海口市肺结核病流行特征分析[J]. 公共卫生与预防医学, 2022, 33(1): 107-109.
Zhong S, Wang ZY, Guo LW, et al. Epidemiological characteristics of tuberculosis in Haikou in 2016-2020[J]. J Pub Health Prev Med, 2022, 33(1): 107-109.

33 孙果梅, 路丽苹, 彭文祥, 等. 2006-2009年上海市松江区结核病空间分布特征及影响因素[J]. 中华预防医学杂志, 2012,(10): 903-907.
Sun GM, Lu LP, Peng WX, et al. Spatial distribution and risk factors of tuberculosis in Songjiang district, Shanghai during 2006 and 2009[J]. Chin J Prev Med, 2012,(10): 903-907.

34 麦精兰, 冯雄, 吴克长. 2016-2021年海口市新涂阳肺结核流行病学调查及耐药性监测[J]. 中国国境卫生检疫杂志, 2022, 45(5): 407-409.
Mai JL, Feng X, Wu KC. Epidemiological survey and drug resistance surveillance of newly smear-positive pulmonary tuberculosis in Haikou, from 2016 to 2021[J].Chin J Front Health Quar, 2022, 45(5): 407-409.

35 夏欢, 潘在兴, 洪云, 等. 海口地区耐药结核病的流行病学特征及其影响因素分析[J]. 解放军医学杂志, 2024,49(8):973-976.
Xia H, Pan ZX, Hong Y, et al. Epidemiological characteristics and influencing factors of drug-resistant tuberculosis in Haikou area[J].Med J Chin PLA, 2024, 49(8):973-976.

36 Bie S, Hu X, Zhang H, et al. Influential factors and spatial-temporal distribution of tuberculosis in mainland China[J]. Sci Rep, 2021, 11(1): 6274.

[本文编辑] 宋睿璞 朱 昊