

基于地理探测器的中国肺结核发病率影响因子研究

王晓琴

北京建筑大学理学院, 北京

收稿日期: 2025年3月21日; 录用日期: 2025年4月12日; 发布日期: 2025年4月23日

摘要

基于2010~2020年中国31个省级行政区的肺结核发病率数据, 综合运用Joinpoint回归模型、空间自相关分析和地理探测器方法, 探究全国肺结核发病率的时空演变特征及其驱动因子。结果显示, 全国肺结核发病率整体呈“西高东低”的空间分布格局, 西部地区年均发病率为89.93/10万, 高于东部、中部及东北部地区。时间趋势上, 多数省份的AAPC为负值, 肺结核发病率呈显著下降趋势, 但西藏、青海等地区呈上升趋势。全局空间自相关分析表明, Moran's I指数由2010年0.2834升至2020年0.4306, 发病率存在显著空间正相关性, 高发区域聚集效应逐年增强。地理探测器分析揭示, 医疗因素中医疗卫生机构数的q值最大, 为0.5011, 是解释发病率空间分异性的首要因子; 交互作用探测表明, 多因子协同效应导致非线性增强效应或双因子增强效应, 其中医疗卫生机构数 \cap O₃组合解释力最高, q值为0.81。

关键词

Joinpoint, 空间自相关, 地理探测器

Study on Influencing Factors of Tuberculosis Incidence in China Based on Geographical Detector

Xiaoqin Wang

School of Science, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing

Received: Mar. 21st, 2025; accepted: Apr. 12th, 2025; published: Apr. 23rd, 2025

Abstract

Based on the incidence rates of tuberculosis in 31 provincial-level administrative regions in China from

文章引用: 王晓琴. 基于地理探测器的中国肺结核发病率影响因子研究[J]. 统计学与应用, 2025, 14(4): 216-226.

DOI: 10.12677/sa.2025.144103

2010 to 2020, we investigated the spatial and temporal evolution of the incidence rates of tuberculosis and its driving factors by using the Joinpoint regression model, spatial autocorrelation analysis, and geodetic detector methods. The results showed that the overall spatial distribution pattern of TB incidence was “high in the west and low in the east”, and the average annual incidence rate in the western region was 89.93/100,000, which was higher than that in the eastern, central and northeastern regions. In terms of temporal trend, the AAPC was negative in most provinces, and the incidence rate of TB showed a significant downward trend, but Tibet, Qinghai and other regions showed an upward trend. Global spatial autocorrelation analysis showed that Moran’s I index increased from 0.2834 in 2010 to 0.4306 in 2020, with a significant positive spatial correlation in incidence rates and the clustering effect of high prevalence regions increasing year by year. Geographic detector analysis revealed that the q-value of the number of healthcare institutions among the medical factors was the largest, 0.5011, which was the primary factor explaining the spatial heterogeneity of the incidence rate; interaction detection showed that the synergistic effect of multiple factors led to a nonlinear enhancement effect or a two-factor enhancement effect, in which the number of healthcare institutions \cap O_3 combination had the highest explanatory power, with a q-value of 0.81.

Keywords

Joinpoint, Spatial Autocorrelation, Geographic Detector

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

肺结核(Tuberculosis, TB)是一种由结核分枝杆菌感染引发的肺部疾病,主要经呼吸道传播,当结核病患者咳嗽时,结核分枝杆菌会以气溶胶形式扩散至空气中,被潜在宿主吸入肺泡后,便可能引发感染[1]。结核病是一种困扰人类上千年的疾病,其最早有记录的病例出现在距今已有 8000 多年新石器时代早期(前陶期)的黎凡特人群中[2]。2024 年世界卫生组织《全球结核病报告》显示:2023 年全球新增结核病病例约 1080 万,发病率增长 0.2%后趋于稳定,增速放缓。全球结核病死亡人数连续第二年下降,2023 年约 125 万,低于疫情前水平,但结核病仍可能是全球单一传染病致死的首要原因。30 个高负担国家的结核病病例占全球总数的 87%,其中印度(26%)、印度尼西亚(10%)、中国(6.8%)、菲律宾(6.8%)和巴基斯坦(6.3%)五国占全球总数的 56% [3]。

2. 数据与方法

2.1. 数据来源

全国 31 个省、自治区、直辖市(不包括香港特别行政区、澳门特别行政区、台湾地区)2010 年至 2020 年逐年肺结核发病率(1/10 万)数据来源于公共卫生科学数据中心(<https://www.phsciencedata.cn/Share/>)。全国 31 个地区 2010 年至 2020 年肺结核发病率影响因素年度数据来源于国家统计局(国家数据(<https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>))。

2.2. 研究方法

2.2.1. Joinpoint 回归分析

Joinpoint 回归模型[4][5]是一种基于分段线性回归的时间趋势分析方法,旨在识别时间序列数据中具

有统计学意义的趋势转折点，并量化各分段趋势变化速率。通过引入 k 个转折点 $(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k)$ ，将时间序列划分为 $k+1$ 个连续区间，每个区间内的趋势通过对数线性方程描述。

模型公式如下：

$$E[y_i | x_i] = e^{\beta_0 + \beta_1 x_i + \delta_1 (x_i - \tau_1)^+ + \dots + \delta_k (x_i - \tau_k)^+}$$

其中， $y_i (i=1, 2, \dots, n)$ 是因变量，为各地区肺结核发病率； $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 是自变量，为年份；

$\tau_i (i=1, 2, \dots, k)$ 是未知的转折点； $\delta_k = \beta_{n+1,1} - \beta_{n,1}$ 是回归模型分段函数的回归系数， k 是待定的转折点数。

通过计算年度百分比变化(APC)和平均年度百分比变化(AAPC)趋势变化指标分析 2010~2020 年全国 31 个地区肺结核发病率的总体趋势。

$$APC_i = (e^{\beta_i} - 1) \times 100\%$$

$$AAPC = \left(\exp \left(\frac{\sum w_i \beta_i}{\sum w_i} \right) - 1 \right) \times 100\%$$

其中 w_i 为第 i 分段的年数占比， β_i 为分段斜率。

2.2.2. 空间自相关分析

空间自相关分析是一种重要的空间统计工具，主要用于研究一个地区空间单元上的某一属性值是否与邻近地区空间单元上同一属性值存在相关性，通过计算空间自相关系数，度量空间单元属性值聚集离散程度的方法。根据分析的范围和目的不同，可分为全局空间自相关分析和局部空间自相关分析。

(1) 全局空间自相关分析

为探究 2010~2020 年全国肺结核发病率的的空间分布特征及其动态聚集规律，采用全局空间自相关分析方法，基于 ArcGIS 10.8 平台对全国 31 个省级行政区的肺结核发病率数据进行空间统计分析。全局 Moran's I 指数通常是用来度量空间相关性的一个重要指标，由 Moran 于 1950 年提出[6]并广泛应用于空间相关性研究，其通过量化属性值在空间邻接单元间的相似程度，能够有效揭示区域整体的空间聚集模式，全局 Moran's I 的取值范围为-1 到 1，当 $Z > 1.96$ 、 $P < 0.05$ 且全局 Moran's I 值 > 0 ，表示呈现空间正相关，全局 Moran's I 值越大，在空间分布上呈现出的集聚效应越明显，当 $Z > 1.96$ 、 $P < 0.05$ 且全局 Moran's I 值 < 0 ，表示呈现空间负相关，全局 Moran's I 值越小，属性值在空间分布上呈现出的分散效应越明显[7]。全局 Moran's I 计算公式如下：

$$Moran's\ I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{i,j} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{i,j} \right) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, (i \neq j)$$

其中 $W_{i,j}$ 是区域 i 和 j 之间的空间权重。 n 代表空间要素的数量，即 31 个省级行政单位， x_i 和 x_j 代表区域 i 和 j 的肺结核年发病率。

2.2.3. 地理探测器

地理探测器[8]是一种统计学上的研究手段，其核心目标是探测地理空间的分异性特征，并进一步揭示其背后的驱动力因素。囊括了四个关键探测器，分别是分异及因子探测器、交互作用探测器、风险区探测器以及生态探测器。这四个探测器共同构建了地理探测器的研究体系，旨在全面且深入地剖析

地理空间分异性的各种特征与成因。其核心假设是，若自变量对因变量有显著影响，那么他们的空间分布应具有极大相似性。

(1) 单因子探测

因子探测的核心在于分析解释变量与被解释变量在空间分布上是否呈现相似性，以此来评估解释变量对被解释变量是否具有决定性的影响。用于探测变量 y 的空间分异性，以及某一因子 x 多大程度上解释了变量 y 的空间分异，对因子 x 的解释用 q 值度量，其表达式如下：

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST}$$

其中 $h = 1, L$ 为变量 Y 或因子 X 的分层； N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数； σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h 和全区 Y 值的方差， SSW 和 SST 分别为层内方差之和(Within Sum of Squares)和全区总方差(Total Sum of Squares)。 q 的值域为[0,1]， $q = 0$ 时表明肺结核发病完全不受风险因子的影响； q 值越大说明肺结核发病的空间分异性越明显，风险因子 x 对发病的解释力越强，反之则越弱； $q = 1$ 时则表明风险因子完全控制了肺结核发病。

(2) 交互探测

交互探测是用于识别多重风险因素协同作用的研究方法，其核心在于评估变量 $X1$ 与 $X2$ 在肺结核发病机制中是否存在协同增效、拮抗抑制或独立作用等关联模式。通过单独测算各因子的 q 值指标并与协同作用后的数值进行比较，进而解析变量间的相互作用机制。最终将交互作用划分为五种类型：非线性减弱、单因子非线性减弱、双因子增强、独立关系以及非线性增强。如表 1：

Table 1. Types of interaction of the two independent variables on the dependent variable
表 1. 两个自变量对因变量交互作用的类型

判断依据	交互作用
$q(X1 \cap X2) < \text{Min}(q(X1), q(X2))$	非线性减弱
$\text{Min}(q(X1), q(X2)) < q(X1 \cap X2) < \text{Max}(q(X1), q(X2))$	单因子非线性减弱
$q(X1 \cap X2) > \text{Max}(q(X1), q(X2))$	双因子增强
$q(X1 \cap X2) = q(X1) + q(X2)$	独立
$q(X1 \cap X2) > q(X1) + q(X2)$	非线性增强

若交互结果出现双因子增强，则说明两因子的交互作用均大于任意因子对发病的单独影响力；若出现非线性增强，则说明两因子的交互作用的解释力大于任意因子单独发挥作用的解释力之和。

3. 结果

3.1. 肺结核发病率趋势分析

2010~2020 年全国各省、自治区、直辖市肺结核发病率见图 1，2010 年全国肺结核发病率为 74.27/10 万，到 2020 年的发病率降低为 47.76/10 万，较 2010 年发病率下降 35.69%。发病率整体呈“西高东低”分布。东部地区、中部地区和东北地区各区域的肺结核发病率均呈下降趋势；西部地区中，新疆、西藏、青海的发病率呈先升后降的趋势，甘肃、云南呈先降后升的趋势。

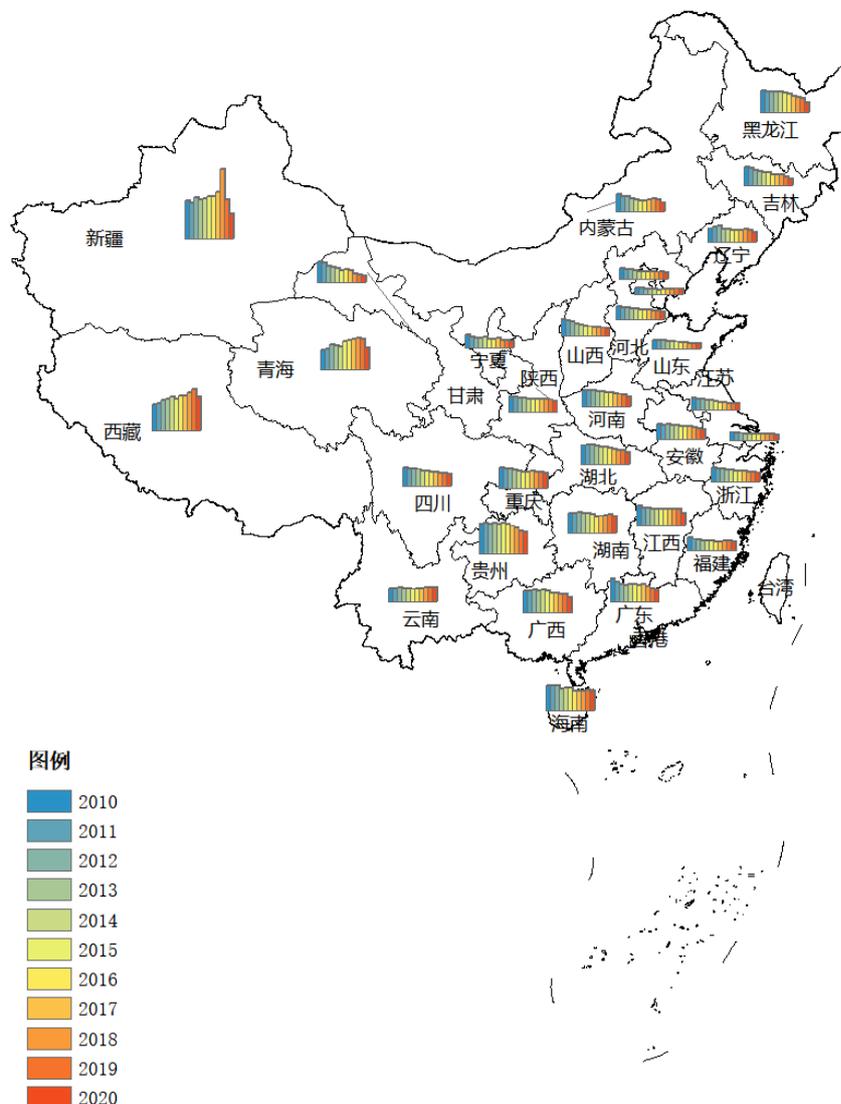


Figure 1. Incidence of tuberculosis in 31 regions of the country, 2010~2020
图 1. 2010~2020 年全国 31 个地区肺结核发病率

对 2010~2020 年全国 31 个地区肺结核发病率的变化趋势进行分析,通过计算年均百分比变化(AAPC)及其显著性水平(P 值)评估趋势的统计学意义, 见表 2。结果显示,多数省份的肺结核发病率呈现显著下降趋势,如山西的 AAPC 为-8.1*、 $P < 0.001$;吉林的 AAPC 为-8.8*、 $P < 0.001$,大部分省份的 AAPC 值均为负数且 P 值远小于 0.05,表明这些地区在 2010~2020 年肺结核发病率呈显著的逐年下降。部分地区的发病率呈现上升趋势,云南的 AAPC 为 0.6、青海的 AAPC 为 1.1。而西藏的 AAPC 为 3.4*、 $P < 0.001$,表明其发病率呈显著上升趋势。

Table 2. AAPC and P-values of TB incidence in 31 districts of the country
表 2. 全国 31 个地区肺结核发病率的 AAPC 值及 P 值

省份	AAPC	P 值	省份	AAPC	P 值	省份	AAPC	P 值
北京	-4.0*	< 0.001	浙江	-3.8*	< 0.001	海南	-2.8*	< 0.001

续表

天津	-1.7	0.078	安徽	-4.2*	< 0.001	重庆	-2.7*	< 0.001
河北	-4.8*	< 0.001	福建	-3.2*	< 0.001	四川	-3.9*	< 0.001
山西	-8.1*	< 0.001	江西	-2.5*	0.002	贵州	-3.1*	< 0.001
内蒙古	-4.7*	0.001	山东	-4.9*	< 0.001	云南	0.6	0.121
辽宁	-3.3*	0.002	河南	-5.1*	< 0.001	西藏	3.4*	< 0.001
吉林	-8.8*	< 0.001	湖北	-4.6*	< 0.001	陕西	-2.8*	< 0.001
黑龙江	-7.4*	< 0.001	湖南	-1.7*	0.002	甘肃	-9.9*	< 0.001
上海	-2.6*	< 0.001	广东	-4.8*	< 0.001	青海	1.1	0.578
江苏	-6.1*	< 0.001	广西	-2.8*	0.001	宁夏	-4.7*	< 0.001
						新疆	-0.29*	0.014

2010~2020年四大经济分区内不同地区肺结核年均发病率见图2，东部地区的年均发病率为47.17/10万，北京、天津、河北、上海、江苏、福建、山东低于东部地区整体的年均发病率；浙江、广东、海南的年均发病率在东部地区中较高，海南的年均发病率在东部地区中最高。中部地区的年均发病率为65.93/10万，山西、安徽、河南在中部地区中的年均发病率较低，江西、湖北、湖南的年均发病率在中部地区中较高，湖南的年均发病率在中部地区中最高。东北地区的年均发病率为64.08/10万，其中辽宁、吉林的年均发病率较低，黑龙江的年均发病率最高。西部地区的年均发病率为89.93/10万，其中内蒙古、重庆、四川、云南、陕西、甘肃、宁夏的年均发病率在西部地区中较低，而广西、贵州、西藏、青海省、新疆的年均发病率较高，新疆的年均发病率不仅在西部地区中最高，在全国31个地区中也最高，西部地区整体比东部、中部、东北部地区的发病率高。

中国2010-2020年不同地区的肺结核发病率均值

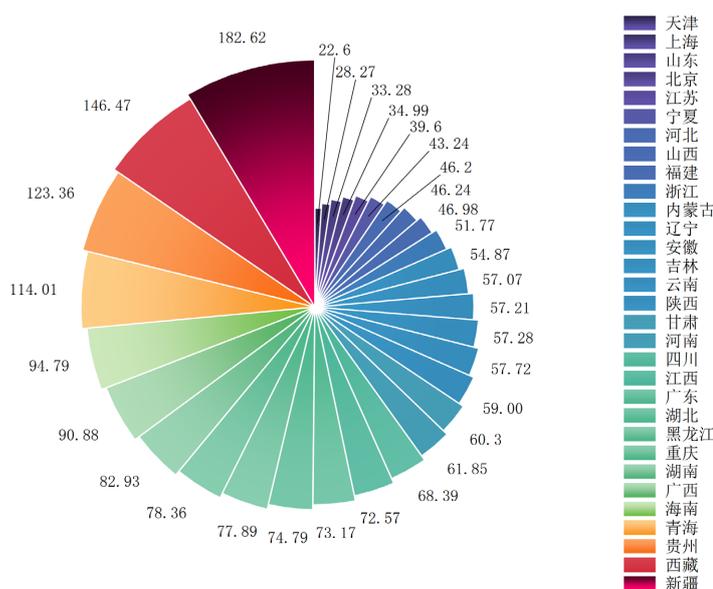


Figure 2. Average incidence rates of tuberculosis in different regions of China, 2010~2020
图2. 中国2010~2020年不同地区的肺结核发病率均值

3.2. 全局空间自相关

全局空间自相关分析是研究肺结核发病率的分布特征的研究方法。通过计算全局 Moran's I 指数、Z 值和 P 值三类指标,量化评估全国各地肺结核发病率的空间相关性,见表 3。结果显示,2010~2020 年间所有年份的 Z 值均超过 1.96 ($P < 0.05$),且在 95%置信水平下具有统计学意义,证实空间分布非随机性。全局 Moran's I 指数均为正值,表明肺结核发病率存在显著的空间正相关特征,较高的肺结核发病率地区往往与同样高发的地区相邻,具体数值从 2010 年的 0.2834 增加至 2020 年的 0.4306,表明空间聚集性随时间逐步增强。

Table 3. Global spatial autocorrelation analysis for the 31 regions of the country, 2010~2021

表 3. 全国 2010~2021 年 31 个地区全局空间自相关分析

年份	Moran's I 指数	Z 值	P 值	方差
2010	0.2834	2.9911	0.0027	0.0112
2011	0.3352	3.4498	0.0006	0.0114
2012	0.3486	3.6465	0.0003	0.0110
2013	0.3663	3.7972	0.0001	0.0111
2014	0.3497	3.6565	0.0003	0.0110
2015	0.3591	3.7484	0.0002	0.0110
2016	0.3821	3.9988	0.0001	0.0108
2017	0.3914	4.1737	0.0000	0.0103
2018	0.2938	3.7605	0.0002	0.0076
2019	0.4064	4.2741	0.0000	0.0106
2020	0.4306	4.4747	0.0000	0.0108

3.3. 最优参数的地理探测器

3.3.1. 连续变量的最优参数离散化

本研究以 2010~2020 年肺结核发病率作为因变量,选取涵盖环境、社会经济、交通、医疗及教育五大领域的 21 个影响因素作为自变量,详见表 4。在数据分析前,使用 R 语言对原始数据进行清洗,包括缺失值插补、变量标准化及异常值剔除,导入 GD 包进行参数最优地理探测器分析。自变量的离散化方法及其类别数量对地理探测器 q 值具有显著影响,并且参数优选是提升地理探测器解释力的必要前提。为实现最优参数组合,研究设定离散类别数量范围为 4~10 类,系统遍历等距离散化(Equal Interval)、自然断点法(Natural Breaks)、分位数离散化(Quantile)及几何间隔离散化(Geometric Interval)四种方法。基于 GD 包构建参数优选框架,通过网格搜索(Grid Search)计算所有组合(4 方法 × 7 类别数 = 28 种组合)的 q 值,最终选取各变量 q 值最大化的离散方案,该方法有效解决了传统地理探测器中离散参数主观设定的局限性。

Table 4. Drivers of spatial variability in TB incidence and discretization results

表 4. 影响肺结核发病率空间分异性的驱动因子及离散化结果

	驱动因子	探测因子	分类方式	分类个数
环境因素	$\text{NO}_2 (\mu\text{g}/\text{m}^3)$	X1	quantile	10
	$\text{O}_3 (\mu\text{g}/\text{m}^3)$	X2	natural	6

续表

	$PM_{2.5}(\mu g/m^3)$	X3	natural	9	
	$PM_{10}(\mu g/m^3)$	X4	equal	8	
	城镇化率(%)	X5	equal	10	
	人均地区生产总值(元/人)	X6	natural	7	
社会经济因素	城镇居民人均可支配收入(元)	X7	quantile	9	
	农村居民人均可支配收入(元)	X8	quantile	8	
	城镇居民人均消费支出(元)	X9	quantile	6	
	农村居民人均消费支出(元)	X10	geometric	8	
	城镇居民人均医疗保健支出(元)	X11	natural	9	
	农村居民人均医疗保健支出(元)	X12	geometric	9	
	交通因素	铁路客运量(万人)	X13	geometric	9
		公路客运量(万人)	X14	geometric	10
公共汽车客运量(万人次)		X15	geometric	10	
医疗因素	医疗卫生机构数(个)	X16	geometric	9	
	卫生人员数(万人)	X17	geometric	7	
	医院病床使用率(%)	X18	quantile	9	
	村卫生室个数(个)	X19	quantile	10	
教育因素	每十万人口高中阶段平均在校生数(人)	X20	natural	10	
	普通高中师生比(教师人数=1)	X21	quantile	9	

3.3.2. 因子探测结果

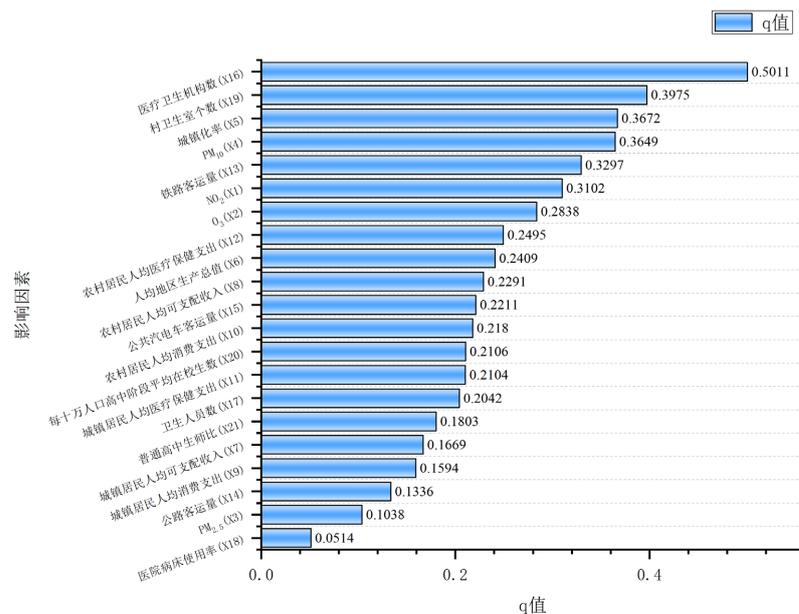


Figure 3. Factor detection results

图 3. 因子探测结果

地理探测器的因子探测器部分测量了多种因素对肺结核发病率空间分异性的影响程度,及其解释力。根据所得结果,见图3,q值范围在0.0514至0.5011之间,表明各个探测因子对肺结核发病率的空間分异性都具有不同程度的影响。在环境因素中,NO₂(X1)、O₃(X2)、PM2.5(X3)和PM10(X4)对空间分异性均有影响,其q值分别为0.3102、0.2838、0.1038和0.3649,其中PM10(X4)对空间分异性的影响相对较强。在社会经济因素中,城镇化率(X5)、人均GDP(X6)和农村居民人均医疗保健支出(X12)等影响因子对空间分异性较为突出,其q值分别为0.3672、0.2409和0.2495。在交通因素中,铁路客运量(X13)对空间分异性相对较强,其q值为0.3297;公共汽电车客运量(X14),q值为0.2211,其对肺结核发病率的空間分异性无显著影响。在医疗因素中,医疗卫生机构数(X16)对空间分异性的影响最强,其q值为0.5011,意味着医疗卫生机构数能够解释肺结核发病率空间分异性的50.11%;村卫生室个数(X19)的q值为0.3975,卫生人员数(X17)的q值为0.2042;医院病床使用率(X18)的q值为0.0514,其对肺结核发病率的空間分异性无显著影响。在教育因素中,每十万人口高中阶段平均在校生数(X20)、普通高中生师比(X21)等指标对空间分异性有显著影响,q值分别为0.2106和0.1803。整体比较各因素的q值大小,医疗因素里的医疗卫生机构数q值最大,对肺结核发病率的空間分异性解释力最强。

3.3.3. 交互作用探测结果

肺结核发病率空间分异性受到地理环境、社会经济、交通、医疗、教育等多方面因素的影响,不仅是由单个因子独立引起的,还受到不同因素之间交互叠加作用的影响。为探究这种交互作用及其形式,采用地理探测器的交互探测器来分析各探测因子之间是否存在交互作用。根据表5的地理探测器的交互作用分析表明,任意两因子的交互作用对肺结核发病率空间分异性的解释力(q值)均高于其独立作用,且交互类型主要表现为非线性增强或双因子增强。举例来说:医疗卫生机构数(X16)对肺结核发病率空间分异性的解释力为0.5011,与环境因素中的NO₂(X1)、PM10(X4)呈双因子增强的交互作用的q值分别提升至0.79、0.69,与O₃(X2)、PM2.5(X3)呈非线性增强的交互作用的q值分别提升至0.81、0.66。与社会经济因素中的城镇化率(X5)、人均GDP(X6)、农村居民人均可支配收入(X8)、农村居民人均消费支出(X10)、城镇居民人均医疗保健支出(X11)、农村居民人均医疗保健支出(X12)呈双因子增强的交互作用的q值分别提升至0.76、0.68、0.69、0.67、0.70、0.69,与城镇居民人均可支配收入(X7)、城镇居民人均消费性支出(X9)呈非线性增强的交互作用的q值分别提升至0.70、0.67。与交通因素中的铁路客运量(X13)、公共汽电车客运量(X15)呈双因子增强的交互作用的q值分别提升至0.62、0.67,与公路客运量呈非线性增强的交互作用的q值提升至0.73。与医疗因素中的卫生人员数(X17)、村卫生室个数(X19)呈双因子增强的交互作用的q值分别提升至0.62、0.68,与医院病床使用率(X18)呈非线性增强的交互作用的q值提升至0.64。与教育因素中的每十万人口高中阶段平均在校生数(X20)呈双因子增强的交互作用的q值提升至0.70,与普通高中生师比呈非线性增强的交互作用的q值提升至0.80。其他因子之间的交互作用也呈现双因子增强或非线性增强的增强趋势,肺结核发病率空间分异性不仅仅受单个影响因子的影响,更大程度上取决于各因子的综合作用。

Table 5. Interaction detection results
表 5. 交互探测结果

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	X15	X16	X17	X18	X19	X20
X2	0.47																			
X3	0.60	0.42																		
X4	0.66	0.63	0.36																	

趋势,但西藏、青海地区呈上升趋势。全局空间自相关分析表明, Moran's I 指数由 2010 年 0.2834 升至 2020 年 0.4306, 发病率存在显著空间正相关性, 高发区域聚集效应逐年增强。

地理探测器分析表明, 医疗因素中医疗卫生机构数的 q 值为 0.5011, 是解释发病率空间分异性的首要因子; 交互作用探测表明, 多因子协同效应导致非线性增强效应或双因子增强效应, 医疗卫生机构数与其他因子的交互作用的解释力整体较高, 医疗卫生机构数与 O_3 组合解释力最高, q 值为 0.81。肺结核发病率空间分异性不仅仅受单个影响因子的影响, 更大程度上取决于各因子的综合作用。

参考文献

- [1] Dheda, K., Barry, C.E. and Maartens, G. (2016) Tuberculosis. *The Lancet*, **387**, 1211-1226. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(15\)00151-8](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(15)00151-8)
- [2] Hershkovitz, I., Donoghue, H.D., Minnikin, D.E., May, H., Lee, O.Y., Feldman, M., *et al.* (2015) Tuberculosis Origin: The Neolithic Scenario. *Tuberculosis*, **95**, S122-S126. <https://doi.org/10.1016/j.tube.2015.02.021>
- [3] World Health Organization (2024) Global Tuberculosis Report 2024. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240101531>
- [4] 曾四清. Joinpoint 回归模型及其在传染病流行趋势分析中的应用[J]. 中国卫生统计, 2019, 36(5): 787-791.
- [5] 白玉娥, 王铂, 何钰珏. 2005-2022 年甘肃省肺结核报告发病流行趋势的 Joinpoint 回归模型分析[J]. 甘肃医药, 2024, 43(7): 649-652.
- [6] Ord, J.K. and Getis, A. (1995) Local Spatial Autocorrelation Statistics: Distributional Issues and an Application. *Geographical Analysis*, **27**, 286-306. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00912.x>
- [7] Yang, D., Li, W., Pan, M., Su, H., Li, Y., Tang, M., *et al.* (2022) Spatial Analysis and Influencing Factors of Pulmonary Tuberculosis among Students in Nanning, during 2012-2018. *PLOS ONE*, **17**, e0268472. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0268472>
- [8] 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.
- [9] 崔馨祿, 陈成江, 李卫霞, 等. 2018-2022 年海南岛肺结核时空聚集性分析[J/OL]. 海南医学院学报: 1-17. <https://doi.org/10.13210/j.cnki.jhmu.20241211.001>, 2025-03-17.
- [10] 吴明慧. 甘肃省肺结核病时空分布格局及影响因素[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 西北师范大学, 2024.
- [11] 景彩梅. 2016~2018 年内蒙古地区肺结核时空分布特征及影响因素研究[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古医科大学, 2023.