

环境化学
Environmental Chemistry
ISSN 0254-6108, CN 11-1844/X

《环境化学》网络首发论文

题目： 基于贝叶斯时空层次模型（BSTHM）和地理探测器法(GeoDetector)对细菌性痢疾的环境风险评估

作者： 张湘雪，程昌秀，徐成东，肖革新，刘杨

收稿日期： 2021-11-09

网络首发日期： 2022-03-31

引用格式： 张湘雪，程昌秀，徐成东，肖革新，刘杨. 基于贝叶斯时空层次模型（BSTHM）和地理探测器法(GeoDetector)对细菌性痢疾的环境风险评估[J/OL]. 环境化学. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1844.X.20220329.1338.004.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2021110901

张湘雪, 程昌秀, 徐成东, 等. 基于贝叶斯时空层次模型 (BSTHM) 和地理探测器法 (GeoDetector) 对细菌性痢疾的环境风险评估[J]. 环境化学, 2022, 41(7): 1-9.

ZHANG Xiangxue, CHENG Changxiu, XU Chengdong, et al. Environmental risk assessment of bacillary dysentery based on BSTHM and GeoDetector[J]. Environmental Chemistry, 2022, 41 (7): 1-9.

基于贝叶斯时空层次模型 (BSTHM) 和地理探测器法 (GeoDetector) 对细菌性痢疾的环境风险评估*

张湘雪^{1,2,3} 程昌秀^{1,3,4} ** 徐成东² ** 肖革新⁵ 刘杨⁶

(1. 北京师范大学, 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京, 100875; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京, 100101; 3. 北京师范大学, 地理科学学部, 北京, 100875; 4. 国家青藏高原科学数据中心, 北京, 100101; 5. 国家食品安全风险评估中心, 北京, 100022; 6. 南方医科大学第七附属医院, 贵阳, 550001)

摘要 在全世界范围, 细菌性痢疾是一个得到广泛关注的健康问题, 具有显著的时空异质性, 但大多数研究只是在某一区域单独实施了时间或空间层面的分析, 其不同地区的时空关联尚不清楚. 考虑到山东省社会经济发展不平衡, 东、中、西部差异明显, 因此本研究首先利用贝叶斯时空层次模型 (BSTHM) 呈现山东省细菌性痢疾的时空异质性, 其次利用地理探测器法 (GeoDetector) 分别从不同的区域 (东、中、西部) 来研究气象要素对此疾病的影响, 且针对热点地区, 量化社会经济要素及其两两的交互作用对其的解释力. 结果表明, 时间上, 发病高峰出现在夏季. 空间上, 高风险地区主要分布在山东省东部和北部区县, 且气象因子在不同地区对该病的影响也存在显著差异. 山东省东部沿海地区最重要的两个主导因子是风速和日照时数, 其解释力分别为 0.28 和 0.22. 山东省西部内陆地区前两个主导因子为平均温度和降水量, 其解释力分别为 0.47 和 0.32. 山东省中部地区前两个主导因子为平均温度和风速, 其解释力分别为 0.66 和 0.48. 本研究通过对山东省各个地区细菌性痢疾发病情况的时空异质性以及影响因素的分析发现, 湿热的环境有利于细菌性痢疾的传播. 另外, 在热点地区, 起主导作用的社会经济因子是第三产业比重, 表明社会经济状况对细菌性痢疾的发病具有一定的影响作用, 为本地区细菌性痢疾的控制和预防政策的制定提供理论依据, 针对不同地区需要更具体的方案来预防、控制和分配医疗资源, 以提高其疾病应对能力, 减少该疾病造成的潜在损失.

关键词 地理探测器, 时空异质性, 影响因子, 细菌性痢疾, 贝叶斯时空层次模型.

Environmental risk assessment of bacillary dysentery based on BSTHM and GeoDetector

ZHANG Xiangxue^{1,2,3} CHENG Changxiu^{1,3,4} ** XU Chengdong² **
XIAO Gexin⁵ LIU Yang⁶

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing, 100875, China; 2. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101, China; 3. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing, 100875, China; 4. National Tibetan Plateau Data Center, Beijing, 100101, China; 5. China National Center for Food Safety Risk Assessment, Beijing, 100022, China; 6. The Seventh Affiliated Hospital, Southern Medical University, Guiyang, 550001, China)

2021年11月9日收稿(Received: November 9, 2021).

* 国家重点研发计划重点专项(2019YFA0606901)资助.

Supported by National Key Research and Development Plan of China [grant numbers 2019YFA0606901].

** 通信联系人 Corresponding author, E-mail: chengcx@bnu.edu.cn; xucd@reis.ac.cn

Abstract Bacillary dysentery remains a worldwide public health problem, which has been found to have spatial-temporal heterogeneity, however most studies have only focused on the disease from either a time or space perspective, the spatial-temporal association in different regions between them has been still unclear. Considering the heterogeneity of socioeconomic conditions in Shandong, in this study, the Bayesian space-time hierarchy model (BSTHM) was used to identify the spatial-temporal heterogeneity of this disease in Shandong province, China. And then GeoDetector was used to quantify the determinant power of meteorological factors and their interactive effect among different regions in Shandong. Moreover, as for hot spots, the association between socioeconomic factors and bacillary dysentery was also qualified. The results indicated that, temporally, the incidence peaked in summer. Geographically, the hot spots were distributed discretely among three regions, among which the effect of meteorological factors on this disease exist significant discrepancy. The most important two dominant factors of eastern coastal region were wind speed and sun hour, with determinant powers of 0.28 and 0.22, respectively. The first two dominant factors of western inland region were average temperature and precipitation, with determinant powers of 0.47 and 0.32, respectively. The first two dominant factors of middle region were average temperature and wind speed, with determinant powers of 0.66 and 0.48, respectively, and the dominant socioeconomic factor was proportion of the tertiary industry. These findings suggest that in a hot and humid environment and socioeconomic conditions would boost the transmission of bacillary dysentery, which can be served as a suggestion and basis for the surveillance and will be helpful for this disease control and implementing disease-prevention policies.

Keywords GeoDetector, spatial-temporal heterogeneity, meteorological factors, bacillary dysentery, Bayesian spatial-temporal hierarchy model.

细菌性痢疾是常见的由痢疾杆菌引起的肠道传染病。主要有志贺痢疾杆菌、福氏痢疾杆菌、鲍氏痢疾杆菌以及宋氏痢疾杆菌组成^[1-2]。这种疾病主要通过粪-口途径传播,会通过接触受污染的水,食物进行传播,以及人与人之间的接触也是主要的传播方式^[3-4]。典型的症状包括腹泻、发烧、粉刺和黏液血^[5]。

迄今为止,细菌性痢疾仍然是发达国家和发展中国家共同面临的全球性公共卫生问题^[6-7]。每年,全世界报告的病例数超过 1.6 亿,死亡人数超过 110 万^[8]。在中国,过去的几十年中,该病每年造成约 300 人死亡,2015 年其被认为五大传染病之一^[9]。由于目前还不完全清楚该疾病的发病机制,随时可能引起大规模流行。因此,针对该疾病发病风险的时空异质性的研究,量化不同地区气象因子和社会经济因子对细菌性痢疾发病率的解释力,将为制定因地制宜的细菌性痢疾风险控制和疾病预防政策提供建议。

许多研究普遍认为,气象因素对细菌性痢疾的传播具有重要影响。例如,有研究表明,北京细菌性痢疾发病率最高是在 6 月至 9 月^[10],济南细菌性痢疾的发病风险在夏季和秋季达到高峰^[11],印度细菌性痢疾的高峰期大多发生在炎热的夏季^[12]。在亚洲南部城市达卡,从 9 月到 12 月,细菌性痢疾发病率一直处于很高的状态^[13]。同样,Liu 等利用主成分分析和分类回归树方法研究中国的细菌性痢疾发病率与天气变量之间的关系,结果表明当最低温度处于较高水平时,如果相对湿度或降水处于较高水平,则痢疾的发病率很高^[14]。Liu 等利用广义相加模型研究济南市气象因素和细菌性痢疾的关系,其结果表明温度超过阈值后,温度每升高 5 °C,滞后 0 时细菌性痢疾病例数就会增加 19%^[15]。Li 等利用广义相加模型在北京的研究表明温度和相对湿度对细菌性痢疾的影响存在阈值,其建议在制定预防和控制措施中能予以考虑^[16]。Yan 等利用带有解释变量的自回归综合移动平均模型量化北京地区气象变量和细菌性痢疾病例之间的关系,其发现北京地区滞后 2 个月的温度和滞后 12 个月的降雨与细菌性痢疾病例数呈正相关^[17]。这些研究论证了单个气象因素对细菌性痢疾发病率的时空异质性有线性关系^[18],但对气象因子对细菌性痢疾的非线性关系及其两两交互作用对细菌性痢疾影响的研究较少。

同时,细菌性痢疾的发病率也呈现明显的空间不均匀性.一些研究表明,它与社会经济因素密切相关,比如过于拥挤的生活或工作环境,较差的卫生条件以及不完备的社会基础设施都会在细菌性痢疾的传播方面起到一定的促进作用.例如, Kotloff 等指出,中国的细菌性痢疾发病率高于许多发达国家,如美国、澳洲、英国和法国^[1]. Chang 等指出,该病在中国西北(包括西藏、宁夏和新疆)和中国北方(包括北京和天津)的发病率高于中国其他地区^[9]. 同样, Xu 等指出,北京和天津这两个发达城市的细菌性痢疾风险在中国排名前两位^[10].

目前,很少有研究针对同一省份的不同区域,从时空视角分别量化细菌性痢疾的异质性,同时揭示在不同区域的主导因子及其不同因子两两结合之后对该疾病的影响.本研究是基于 2012—2013 年山东省细菌性痢疾数据展开的相关研究,空间尺度为区县,时间尺度为周,数据详细.目的是:1)利用 BSTHM 探讨山东省区县级细菌性痢疾风险的时空异质性;2)利用 GeoDetector 方法量化气象、社会经济因素及其交互影响对细菌性痢疾的解释力;3)识别细菌性痢疾发病率的热点(发病风险高的地区)、冷点区域(发病风险低的地区)及其机制的解释.

1 研究方法 (Methods and data)

1.1 研究区概况

山东省位于中国东部沿海,其东部和北部的一些地区延伸入海,中部和西部地区多山、丘陵,是华北平原的一部分(图 1).由于地理环境的影响,沿海到内陆地区的气候变化很大.平均气温由东北沿海向西南方向变化,沿海城市一年内高温出现的时间晚于内陆城市.另外,山东省社会经济发展不平衡:东,中,西部差异明显,考虑以上因素,山东省被分为东部(烟台、东营、青岛、潍坊、威海、日照)、中部(济南、淄博、枣庄、济宁、泰安、莱芜、临沂、滨州)和西部(德州、聊城、菏泽)的 3 个区域^[20],研究山东省气象、社会经济因素对细菌性痢疾时空异质性的解释力及各因子的交互作用.

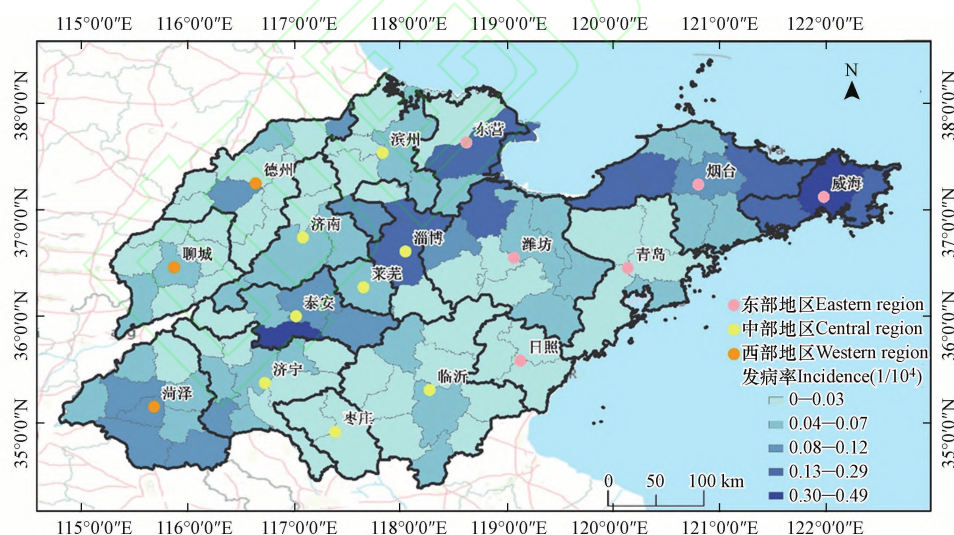


图 1 山东省的地理位置及 2012—2013 年细菌性痢疾月发病率空间分布图

Fig.1 Geographic location of Shandong Province and spatial distribution of monthly incidence of bacillary dysentery from 2012—2013

1.2 数据源

采用的细菌性痢疾数据是 2012.9.1—2013.8.31,共 53 周每周的数据,总病例数为 8014 例,数据来源于中国公共卫生科学数据中心;月均发病率则由每周的数据加和得出每月病例数,然后再除以总人口计算所得(图 1).每个区县同时间段的社会经济数据来自《山东省统计年鉴》,包括人口数据、农村人口比例、第二产业比重、第三产业比重.另外,在本研究中,包括山东省 17 个地级市(菏泽、聊城、德州、济宁、泰安,济南、枣庄、莱芜、滨州、临沂、淄博、东营、日照、潍坊、青岛、烟台、威海),共

103 个区县. 从中国气象数据共享服务系统收集同时期的每日的气象数据, 包括平均温度(AT)、日照时数(SH)、相对湿度(RH)、降水(PC)和风速(WS), 然后利用各气象因子的日数据计算出气象数据各因子的周均和月均值.

1.3 贝叶斯时空层次模型

贝叶斯时空层次模型(BSTHM)有助于揭示研究对象的时空异质性^[21]. 其可以在充分利用样本信息、先验信息的基础上, 估计时空参数的后验分布, 结果更为稳健. 为了避免由于各区县细菌性痢疾发病率不同可能会出现过度散布的情况, 因此使用基于泊松分布的 BSTHM 用于计算, 进而对疾病数 y_{it} 和风险人数 n_i 进行建模^[21], 公式如下:

$$\begin{aligned} y_{it} &\sim \text{Poisson}(n_{it}u_{it}) \\ \lg(u_{it}) &= \alpha + s_i + (b_0t^* + v_t) + b_{1i}t^* + \epsilon_{it} \end{aligned} \quad (1)$$

其中, u_{it} 描述了山东省每个区县 i ($i = 1, \dots, 103$) 和 t 周 ($t = 1, \dots, 53$) 细菌性痢疾的时空风险. α 是固定效应. s_i 指数反映了研究期间受地理环境、当地的经济条件等较为稳定的因素共同影响下的疾病风险的空间分布^[21]. $\exp(s_i)$ 代表区县 i 相对于 α 的平均疾病风险, 即山东省细菌性痢疾的空间相对风险. 时间项 $b_0t^* + v_t$ 表示总体时间趋势, $v_t \sim N(0, \sigma_v^2)$, t^* 表示研究期间相对于中点 t_{mid} 的时间跨度. 其中 b_{1i} 反映了区县 i 的局部时间趋势与总体时间趋势 b_0 的偏离程度, 如 $b_{1i} \geq 0$ 时, 局部的时间变化强度大于整体的时间变化趋势. 根据 Gelman^[22], $\epsilon_{it} \sim N(0, \sigma_\epsilon^2)$ 表示高斯噪声随机变量. Besag York Mollie (BYM) 模型通过卷积运算实现空间结构随机效应和空间非结构随机效应的相互作用, 以确定参数 s_i 和 b_{1i} 的先验分布. 另外, $\sigma_v, \sigma_\epsilon$ 的先验分布都满足正值半高斯分布 $N_{+\infty}(0, 10)$.

根据 Richardson 提出的分类原则和各地区细菌性痢疾相对风险的高低将研究区进一步划分为热点、冷点和其他区域^[23]. 如果后验概率 $p(\exp(s_i) > 1 \mid \text{data}) \geq 0.80$, 则该县被定义为热点区域. 相反, 如果该值小于等于 0.20, 则该县被定义为冷点区域. 若 $p(\exp(s_i) > 1 \mid \text{data})$ 介于 0.20 和 0.80 之间, 则该县被定义为既不是热点区域也不是冷点区域.

本文计算由 WinBUGS^[24] 软件实现, 通过马尔科夫链蒙特卡罗 (MCMC) 模拟获得模型中所有参数的后验分布. 本文采用 40 万次迭代的 MCMC 链, 其中 20 万次预烧期, 20 万次估算迭代.

1.4 地理探测器(GeoDetector)

地理探测器既可以量化单个影响因子(X)的解释力, 还可以量化不同因素两两的交互作用对因变量(Y)的解释力, 这比传统方法能更全面的反映地理现象. 其假设如果潜在的影响因素对因变量有影响, 则因变量将呈现出与影响变量相似的空间分布^[25-27].

因此, 本研究利用地理探测器分别量化气象因子、社会经济因子(X_s)对细菌性痢疾发病率时空异质性的解释力以及因子两两之间的交互作用对细菌性痢疾发病率的解释力和细菌性痢疾的时、空间分层异质性, 其定义如下:

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

式中, q 值的范围从 0 到 1, 表示影响因子对因变量的解释力或相对重要性, 同时测量细菌性痢疾风险的时、空间分层异质性. N 和 N_h 表示总区县数和每个层内的区县数, 以及 σ^2 和 σ_h^2 是整个研究区域和 h 层内所有统计单元的方差. h 表示将研究区分为 L 层 ($h = 1, 2, \dots, L$).

还可以使用地理探测器量化不同因素(X_s)的交互作用, 它可以进一步揭示不同因素的交互作用 ($X1 \cap X2$) 是减弱还是增强了对 Y 的影响. $q(X1)$, $q(X2)$, 和 $q(X1 \cap X2)$ 分别表示 $X1$ 和 $X2$ 的 q 值, 以及 $X1$ 和 $X2$ 的交互作用 ($X1 \cap X2$) 的 q 值. q 统计值的显著性通过 F 检验来确定, 显著性水平为 0.05. 地理探测器软件可从 www.geodetector.cn 下载.

2 结果与讨论 (Results and Discussion)

2.1 描述性分析

2012 年 9 月 1 日至 2013 年 8 月 31 日, 山东省 103 个区县 53 周共报告细菌性痢疾 8014 例. 细菌性

痢疾发病率最高的出现在夏季(6月至8月),月发病率为 1.22/10000 人. 最低发病率出现在冬季(12月至2月),月发病率为 0.35/10000 人. 山东省社会经济发展不平衡,东、中、西部差异明显,因此本文将山东省分为不同的区域(东、中、西部),分别研究在不同地区,气象和社会经济条件对此疾病的影响.

2.2 细菌性痢疾的时间特征及潜在影响机制

细菌性痢疾在研究期间内总体呈上升趋势(图 2),同时仍存在季节性,其中夏季(6月至8月)发病风险最高,冬季(12月至2月)发病风险最低,说明细菌性痢疾的发病风险具有显著的时间异质性,由地理探测器结果论证,其 q 统计值为 0.51 ($P < 0.05$).

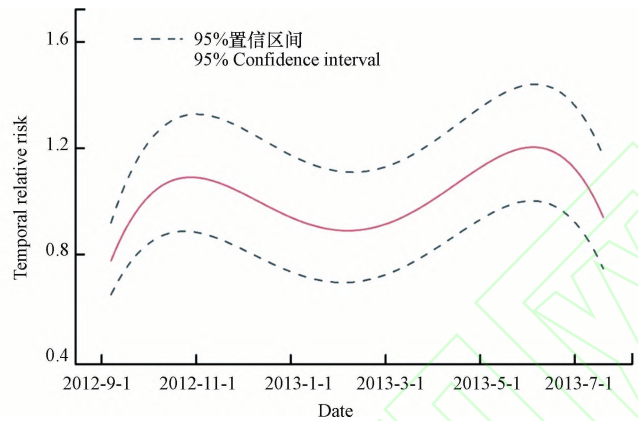


图 2 山东省各区县细菌性痢疾时间相对风险 ($\exp(b_0t^* + v_t)$) 分布图

Fig.2 Temporal relative risk ($\exp(b_0t^* + v_t)$) of bacillary dysentery of each county in Shandong Province

该疾病具有明显的时间异质性,气象因素被认为是其重要的影响因素,且在山东省不同地区,主导的气象因子也不同,即气象因子会在不同地区显示出不同程度地影响这种疾病病毒的繁殖和传播,这一观点被广泛接受^[28-30]. 本研究的结果表明,不同地区的主导因子不同(表 1).

表 1 山东省中部(q_1)、西部(q_2)和东部地区(q_3)各气象因子的解释力

Table 1 The q statistic values of all meteorological factors in central, western, and eastern regions, Shandong

气象要素 Meteorological factors	q_1	q_2	q_3
平均温度/ $^{\circ}\text{C}$	0.66**	0.47*	0.25
相对湿度/%	0.12	0.30	0.14
降水/mm	0.22	0.32	0.20*
风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	0.48*	0.32*	0.28*
日照时数/h	0.17	0.29	0.22*

Note: **显著水平 = 0.01; *显著水平 = 0.05.

本研究中,在山东省中部和西部地区,起主导作用的气象因子是平均温度(q 值 0.66 和 0.47),尤其是中部地区,平均温度对细菌性痢疾发病率的解释力最高(q 值为 0.66)(表 1),与其他研究结果一致. 例如, Gao 等研究结果表明,在长沙,平均气温每升高 1°C ,细菌性痢疾的发病率将随之上升 14.8%^[31]. Liu 等在济南进行的一项研究结果表明,平均气温每升高 1°C ,细菌性痢疾的发病率就会随着增加 11%^[15]. 类似地, Checkley 等在秘鲁进行的研究发现,细菌性痢疾的风险在温度升高 1°C 时,增加了 8%^[32]. 在英国, Tam 等的研究发现,平均气温升高与细菌性痢疾风险增加 5% 有关^[33]. 贾蕾等在北京的研究,论证了细菌性痢疾发病与气温呈显著正相关^[34]. 这些研究结果表明温度对细菌性痢疾的影响其潜在的机制可能是,较高的温度会促进细菌的传播和繁殖,并会在一定程度上延长细菌在温和或适宜环境(如受污染的食物或水中)的存活时间. 另一种可能是,环境中温和的温度可能会促进人群的特定行为模式,例如人们会在温和的天气条件下,会有更多的户外活动,这会增加人与人之间的接触,从而促进细菌性痢疾疾病的传播.

风速也与细菌性痢疾发病率相关,尤其在山东省中部和西部地区(q 值分别为 0.48 和 0.32). 但在

不同的研究中,风速对细菌性痢疾的影响并不总是一致的. Li 等的一项研究结果表明,风速不会影响细菌性痢疾的发病率^[35],而 Liu 等证明,在低风速条件下,细菌性痢疾的发病率会增加^[15]. 这些差异的原因可能是,不同的研究区具有不同的区域特征,因此会产生不同的气候环境,由此对细菌性痢疾发病也会产生不同的影响. 另外,人为因素对于传染病的传播也很重要,例如人口密度和医疗基础设施的差异^[36-37].

降水与细菌性痢疾也呈显著相关,尤其在山东省东部地区(q 值为 0.20). 在不同的研究中,降水对细菌性痢疾的影响也并不总是一致的. 例如, Ma 等发现细菌性痢疾的发病率与降水量之间呈正相关^[38],而 Li 等指出降水对细菌性痢疾的发生有显著的负影响^[35]. 然而, Zhang 等指出降水与细菌性痢疾的发病率之间没有密切的联系^[39]. 可能的潜在机制是,首先,不同地区的气候条件,会对该疾病的传播产生不同的影响. 另一方面,降水会影响水和食物的卫生,从而影响细菌的生长和繁殖.

另外,不同气象因子任意两两结合后对该疾病的作用也同时得以量化. 以山东省中部地区为例,平均气温与相对湿度的 q 值为 0.82; 东部地区风速与日照时数的 q 值为 0.71; 西部地区平均气温与风速的 q 值为 0.64(图 3). 相比于因子的单独作用,因子两两结合之后,明显会增强单个因子对细菌性痢疾发病率的影响^[40]. 可能的潜在机制是,高温潮湿的环境有利于细菌的生存和繁殖,进而促进这种疾病的传播. 而强风也会通过促进细菌的传播,在这种疾病的传播中发挥重要作用. 而且城市是细菌性痢疾及其影响因素的共同空间载体,没有任何因素是单独存在的. 因此,因素的交互作用会增强因子单独对细菌性痢疾的影响.

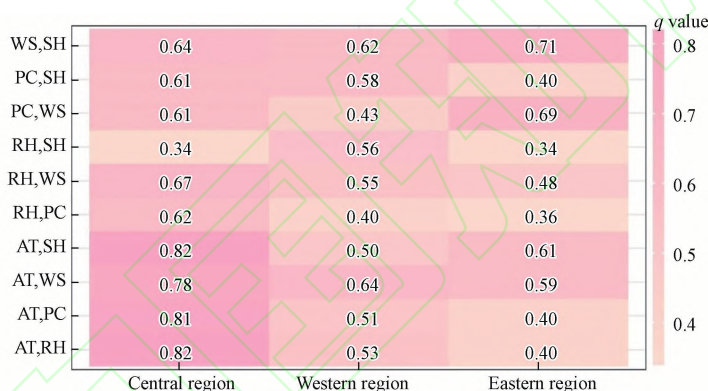


图 3 山东省中部、西部和东部的气象因子对细菌性痢疾的交互作用

Fig.3 Interaction of meteorological factors on bacillary dysentery in central, western and eastern region in Shandong Province

2.3 细菌性痢疾发病率的时空特征及潜在影响机制

空间上,细菌性痢疾的相对风险(RRs)差异显著,由地理探测器计算,细菌性痢疾发病率的空间异质性,即 q 值为 0.51($P < 0.05$),表明其存在明显的空间异质性. 图 4 显示了 2012 年至 2013 年山东省区县级细菌性痢疾的空间相对风险. 高风险地区(热点)分散分布在山东省东部、北部的沿海地区和西南部山区,且地区间经济水平有显著差异. 本文的结果表明细菌性痢疾风险的空间异质性与社会经济因子有关(表 2),说明社会经济因素对该病的空间分布确实有一定的影响.

在山东省 103 个区县中,根据 Richardson 分类规则进行分类^[23]: 其中,有 29 个区县(28.16%)和 34 个区县(33.01%)分别被认为是热点和冷点区域. 另有 40 个区县(38.83%)被认为既不是热点也不是冷点区域. 图 5 显示热点地区主要分布在山东省东部和北部的沿海地区.

针对热点区域(贝叶斯时空层次模型计算出的结果),由地理探测器量化单个社会经济因素及其二者之间任意交互后对该疾病的影响. 结果表明,各社会经济因子对细菌性发病率的解释力大小依次为: 第三产业比重($q = 0.48$)>农村人口比例($q = 0.42$)>第二产业比重($q = 0.28$)>人口密度($q = 0.16$)(表 2).

此外,地理探测器分析了两个社会经济影响因素对细菌性痢疾的交互作用. 两个因素的交互作用明显低于因子的单独作用. 以农村人口比例和第二产业比重的交互作用为例,分别单独对细菌性痢疾的影响为 0.42 和 0.28,而二者的交互作用的解释力达到 0.78,即农村人口比例和第二产业比重共同作

用的结果要高于它们独自作用的结果(表2).

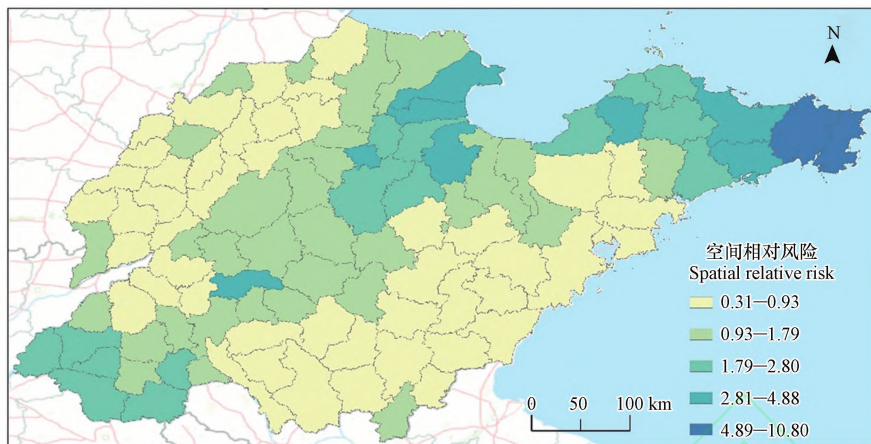


图4 研究时段内山东省细菌性痢疾的空间相对风险

Fig.4 Spatial relative risk of bacillary dysentery in Shandong Province during the study period

表2 热点区域地区各社会经济因子的 q 统计值

Table 2 The q statistic values of all socioeconomic factors in central, western, and eastern regions, Shandong

社会经济要素 Socioeconomic factors	人口密度 Population density	农村人口比例 Proportion of rural population	第二产业比重 Proportion of Secondary industry	第三产业比重 Proportion of tertiary industry
人口密度	0.16			
农村人口比例	0.66	0.42		
第二产业比重	0.35	0.78	0.28	
第三产业比重	0.63	0.62	0.61	0.48

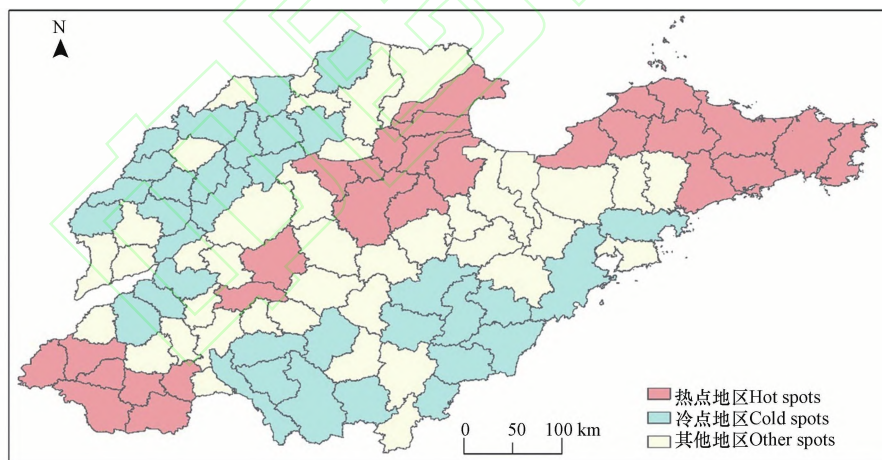


图5 山东省细菌性痢疾热点和冷点的分布图

Fig.5 Distribution of hot and cold spots of bacillary dysentery in Shandong Province

具体而言, 东部地区较西部地区经济水平高, 第三产业比重和农村人口比重对细菌性痢疾的空间异质性的影响很大, 说明, 经济条件对细菌性痢疾的空间分布具有很强的影响, 这与以往的研究一致^[10,19]. 虽然不能完全解释确切的机制, 但有几个原因包括但不限于以下几点. 一方面潮湿的环境会促进病毒的繁殖和传播. 另一方面, 随着经济的快速发展和城市化, 为了满足生活和就业的需要, 农村人口逐渐向城镇和大城市流动, 因此在经济水平较高的地区, 人口密度过高, 也带来了环境污染等诸多问题; 而细菌性痢疾的预防和治疗与当地的经济水平也有关系, 在经济水平较低的地区, 医疗条件较差, 公共设施不完善, 个人卫生意识不强, 也是这些地区细菌性痢疾高发的原因.

本文的亮点之一在于探测了各社会经济因素及其两两交互作用对细菌性痢疾的解释力, 农村人口

比例和第三产业比重是影响细菌性痢疾的主导社会经济因素,其交互作用要大于各自独立影响的作用.潜在的原因可能是,细菌性痢疾的发病受多种因素影响,包括气象和社会经济状况.本研究通过分析各因素的交互影响,为细菌性痢疾的研究提供了新的视角,可为政策制定提供一定的科学依据和贡献.例如,在制定政策时,不仅要考虑单一因素的影响,还要考虑因素的交互作用对细菌性痢疾发病的影响,这将有助于更具体地了解细菌性痢疾的机制,制定政策和战略时更充分地考虑和整合多种因素的相互作用,以提高应对该疾病的能力.而且,不可否认,城市是细菌性痢疾及其影响因素的共同空间载体,没有任何因素是单独存在的.因此,进一步的研究应更加关注因素的综合交互作用对细菌性痢疾的影响.

这项研究仍存在一定的局限性.首先,在本研究中,由于社会经济因素数据的统计口径等问题,空间统计单元使用了区县级的空间数据,将来可以收集更细致统计单位(如空间上:乡镇)的数据用于更详细和完善的研究,为制定政策提供更有价值的信息.另外,有一些尚未考虑到的有可能会影响到细菌性痢疾风险的其他因子,可能会引入一些不确定性.

3 结论 (Conclusion)

本文的研究结果表明炎热和潮湿的环境会影响细菌性痢疾的传播,且较差的卫生条件以及不完善的社会基础设施都会在细菌性痢疾的传播方面起到一定的促进作用.在类似的天气和社会经济条件下,应在考虑不同地区之间的差异性的基础上,加强公共卫生准备工作和分配医疗资源,以预防和控制细菌性痢疾的潜在风险增加.此外,气象因素和社会经济各因素的交互作用对细菌性痢疾的影响大大加强各单个因子的作用,由于所有因子都不是单独存在的,因此在未来的相关研究中,应该综合考虑因子的交互作用对细菌性痢疾的影响,更好地理解该疾病机理,有助于当地政府和防控部门更加科学合理地收集和评估信息,更详细地了解该疾病时空异质性的影响因素.

参考文献 (References)

- [1] KOTLOFF K L, RIDDLE M S, PLATTS-MILLS J A, et al. Shigellosis [J]. *Lancet (London, England)*, 2018, 391(10122): 801-812.
- [2] LIVIO S, STROCKBINE N A, PANCHALINGAM S, et al. *Shigella* isolates from the global enteric multicenter study inform vaccine development [J]. *Clinical Infectious Diseases*: 2014, 59(7): 933-941.
- [3] MATHER A E, BAKER K S, MCGREGOR H, et al. Bacillary dysentery from World War 1 and NCTC1, the first bacterial isolate in the National Collection [J]. *Lancet (London, England)*, 2014, 384(9955): 1720.
- [4] LEE L A, OSTROFF S M, MCGEE H B, et al. An outbreak of shigellosis at an outdoor music festival [J]. *American Journal of Epidemiology*, 1991, 133(6): 608-615.
- [5] SIMINI B. Shigellosis strikes Italian cruise ship passengers [J]. *Lancet*, 1996, 348(9029): 742.
- [6] VINCENT J L, MARSHALL J C, NAMENDYS-SILVA S A, et al. Assessment of the worldwide burden of critical illness: The intensive care over nations (ICON) audit [J]. *Lancet Respiratory Medicine*, 2014, 2(5): 380-386.
- [7] OMBELET S, RONAT J B, WALSH T, et al. Clinical bacteriology in low-resource settings: Today's solutions [J]. *Lancet Infectious Diseases*, 2018, 18(8): e248-e258.
- [8] KOTLOFF K L, WINICKOFF J P, IVANOFF B, et al. Global burden of *Shigella* infections: Implications for vaccine development and implementation of control strategies [J]. *Bulletin of the World Health Organization*, 1999, 77(8): 651-666.
- [9] National Health and Family Planning Commission of the PRC. 2015, Available online: <http://www.nhfpc.gov.cn/jkj/s3578/201602/b9217ba14e17452aad9e45a5bcce6b65.shtml> (accessed on 18 February 2016).
- [10] XU C D, LI Y Y, WANG J F, et al. Spatial-temporal detection of risk factors for bacillary dysentery in Beijing, Tianjin and Hebei, China [J]. *BMC Public Health*, 2017, 17(1): 743.
- [11] ZHANG Y, BI P, HILLER J E. Weather and the transmission of bacillary dysentery in Jinan, Northern China: A time-series analysis [J]. *Public Health Reports (Washington, D. C. :1974)*, 2008, 123(1): 61-66.
- [12] MOORS E, SINGH T, SIDERIUS C, et al. Climate change and waterborne diarrhoea in northern India: Impacts and adaptation strategies [J]. *The Science of the Total Environment*, 2013, 468: S139-S151.
- [13] ALBERT M J, FARUQUE A S G, FARUQUE S M, et al. Case-control study of enteropathogens associated with childhood diarrhea in Dhaka, Bangladesh [J]. *Journal of Clinical Microbiology*, 1999, 37(11): 3458-3464.
- [14] LIU J N, WU X X, LI C L, et al. Identification of weather variables sensitive to dysentery in disease-affected County of China [J]. *The Science of the Total Environment*, 2017, 575: 956-962.
- [15] LIU Z D, LIU Y Y, ZHANG Y, et al. Effect of ambient temperature and its effect modifiers on bacillary dysentery in Jinan, China [J]. *The Science of the Total Environment*, 2019, 650: 2980-2986.

- [16] LI Z J, ZHANG X J, HOU X X, et al. Nonlinear and threshold of the association between meteorological factors and bacillary dysentery in Beijing, China [J]. *Epidemiology and Infection*, 2015, 143: 3510-3519.
- [17] YAN L, WANG H, ZHANG X, et al. Impact of meteorological factors on the incidence of bacillary dysentery in Beijing, China: A time series analysis (1970-2012) [J]. *PLoS One*, 2017, 12(8): e0182937.
- [18] 程昌秀, 史培军, 宋长青, 等. 地理大数据为地理复杂性研究提供新机遇 [J]. *地理学报*, 2018, 73(8): 1397-1406.
- CHENG C X, SHI P J, SONG C Q, et al. Geographic big-data: A new opportunity for geography complexity study [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(8): 1397-1406 (in Chinese).
- [19] CHANG Z R, ZHANG J, RAN L, et al. The changing epidemiology of bacillary dysentery and characteristics of antimicrobial resistance of Shigella isolated in China from 2004-2014 [J]. *BMC Infectious Diseases*, 2016, 16(1): 685.
- [20] ZHU L, WANG X J, GUO Y M, et al. Assessment of temperature effect on childhood hand, foot and mouth disease incidence (0-5years) and associated effect modifiers: A 17 cities study in Shandong Province, China, 2007-2012 [J]. *The Science of the Total Environment*, 2016, 551: 452-459.
- [21] LI G, HAINING R, RICHARDSON S, et al. Space-time variability in burglary risk: A Bayesian spatio-temporal modelling approach [J]. *Spatial Statistics*, 2014, 9: 180-191.
- [22] GELMAN A. Prior distributions for variance parameters in hierarchical models (comment on article by Browne and Draper) [J]. *Bayesian Analysis*, 2006, 1(3): 515-533.
- [23] RICHARDSON S, THOMSON A, BEST N, et al. Interpreting posterior relative risk estimates in disease-mapping studies [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2004, 112(9): 1016-1025.
- [24] LUNN D J, THOMAS A, BEST N, et al. WinBUGS - A Bayesian modelling framework: Concepts, structure, and extensibility [J]. *Statistics and Computing*, 2000, 10(4): 325-337.
- [25] WANG J F, LI X H, CHRISTAKOS G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(1): 107-127.
- [26] WANG J F, ZHANG T L, FU B J. A measure of spatial stratified heterogeneity [J]. *Ecological Indicators*, 2016, 67: 250-256.
- [27] 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 J F, XU C D. Geodetector: principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134 (in Chinese).
- [28] CHENG J, XIE M Y, ZHAO K F, et al. Impacts of ambient temperature on the burden of bacillary dysentery in urban and rural Hefei, China [J]. *Epidemiology and Infection*, 2017, 145(8): 1567-1576.
- [29] GUAN P, HUANG D S, GUO J Q, et al. Bacillary dysentery and meteorological factors in northeastern China: A historical review based on classification and regression trees [J]. *Japanese Journal of Infectious Diseases*, 2008, 61(5): 356-360.
- [30] LEE C C D, TANG J H, HWANG J S, et al. Effect of meteorological and geographical factors on the epidemics of hand, foot, and mouth disease in island-type territory, east Asia [J]. *BioMed Research International*, 2015, 2015: 805039.
- [31] GAO L, ZHANG Y, DING G Y, et al. Meteorological variables and bacillary dysentery cases in Changsha City, China [J]. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 2014, 90(4): 697-704.
- [32] CHECKLEY W, EPSTEIN L D, GILMAN R H, et al. Effect of El Niño and ambient temperature on hospital admissions for diarrhoeal diseases in Peruvian children [J]. *Lancet (London, England)*, 2000, 355(9202): 442-450.
- [33] TAM C C, RODRIGUES L C, O'BRIEN S J, et al. Temperature dependence of reported Campylobacter infection in England, 1989-1999 [J]. *Epidemiology and Infection*, 2006, 134(1): 119-125.
- [34] 贾蕾, 黎新宇, 刘桂荣, 等. 北京气象因素与细菌性痢疾发病关系的研究 [J]. *现代预防医学*, 2007, 34(13): 2470-2471.
- JIA L, LI X Y, LIU G R et al. Analysis of the association between meteorological factors and incidence of dysentery in Beijing [J]. *Modern Preventive Medicine*, 2007, 34(13): 2470-2471 (in Chinese).
- [35] LI Z J, WANG L G, SUN W G, et al. Identifying high-risk areas of bacillary dysentery and associated meteorological factors in Wuhan, China [J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 3239.
- [36] WU X X, LU Y M, ZHOU S, et al. Impact of climate change on human infectious diseases: Empirical evidence and human adaptation [J]. *Environment International*, 2016, 86: 14-23.
- [37] 李媛媛, 徐成东, 肖革新, 等. 京津唐地区细菌性痢疾社会经济影响时空分析 [J]. *地球信息科学学报*, 2016(12): 1615-1623.
- LI Y Y, XU C D, XIAO G X et al. Spatial-temporal analysis of social-economic factors of bacillary dysentery in Beijing-Tianjin-Tangshan, China [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2016(12): 1615-1623 (in Chinese).
- [38] MA S L, TANG Q L, LIU H W, et al. Correlation analysis for the attack of bacillary dysentery and meteorological factors based on the Chinese medicine theory of Yunqi and the medical-meteorological forecast model [J]. *Chinese Journal of Integrative Medicine*, 2013, 19(3): 182-186.
- [39] ZHANG Y, BI P, HILLER J E, et al. Climate variations and bacillary dysentery in northern and southern cities of China [J]. *The Journal of Infection*, 2007, 55: 194-200.
- [40] ZHANG X X, GU X C, WANG L, et al. Spatiotemporal variations in the incidence of bacillary dysentery and long-term effects associated with meteorological and socioeconomic factors in China from 2013 to 2017 [J]. *The Science of the Total Environment*, 2021, 755(Pt 2): 142626.