

# 基于 MGWR 模型的西安手足口病发病影响因素

梁珂梦<sup>1</sup>, 李树芬<sup>1</sup>, 倪志松<sup>1</sup>, 宋思豪<sup>1</sup>, 席睿<sup>1</sup>, 程传龙<sup>1</sup>,  
左慧<sup>1</sup>, 段雨琪<sup>1</sup>, 刘昆<sup>2</sup>, 白尧<sup>3</sup>, 李秀君<sup>1</sup>

(1. 山东大学齐鲁医学院公共卫生学院生物统计学系, 山东 济南 250012;  
2. 空军军医大学军事预防医学系军队防疫与流行病学教研室, 陕西 西安 710032;  
3. 西安市疾病预防控制中心传染病预防控制科, 陕西 西安 710054)

**摘要:**目的 在 5 km×5 km 的空间网格尺度上探讨西安市手足口病发病与环境、社会经济因素等的关系, 为区域防控措施的制定提供依据。方法 收集 2019 年西安市手足口病报告发病率数据, 应用空间自相关分析手足口病空间分布特征; 基于多尺度地理加权回归(multiscale geographically weighted regression, MGWR)模型分析环境与社会经济因素对手足口病发病的影响, 并与普通最小二乘(ordinary least squares, OLS)回归模型以及地理加权回归(geographically weighted regression, GWR)模型结果进行对比。结果 2019 年西安市手足口病年报告发病率为 157.99/10 万, 在空间分布上存在正相关性(全局 Moran's  $I=0.349, P<0.001$ )。MGWR 模型拟合度优于 GWR 模型和 OLS 模型(MGWR:  $R^2=0.530$ ; GWR:  $R^2=0.473$ ; OLS:  $R^2=0.327$ )。各影响因素的作用尺度存在一定差异, GDP、土地城镇化水平、平均气温等作用尺度较大, 归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)作用尺度较小。GDP 与手足口病报告发病率呈显著负相关, 土地城镇化水平、平均气温与报告发病率呈显著正相关, NDVI 在西安部分地区对手足口病发病有显著负向影响。结论 环境与社会经济因素对手足口病发病有显著影响, 且各影响因素的作用存在空间差异, 研究结果可为不同地区制定针对性的预防措施提供依据。

**关键词:** 手足口病; 空间自相关; 多尺度地理加权回归; 地理加权回归; 西安

中图分类号: R181.3; R512.5

文献标志码: A

## Influencing factors on the incidence of hand, foot and mouth disease in Xi'an based on MGWR model

LIANG Kemeng<sup>1</sup>, LI Shufen<sup>1</sup>, NI Zhisong<sup>1</sup>, SONG Sihao<sup>1</sup>, XI Rui<sup>1</sup>, CHENG Chuanlong<sup>1</sup>,  
ZUO Hui<sup>1</sup>, DUAN Yuqi<sup>1</sup>, LIU Kun<sup>2</sup>, BAI Yao<sup>3</sup>, LI Xiujun<sup>1</sup>

(1. Department of Biostatistics, School of Public Health, Cheeloo College of Medicine, Shandong University, Jinan 250012, Shandong, China; 2. Department of Epidemiology, School of Military Prevention Medicine, Air Force Medical University, Xi'an 710032, Shaanxi, China; 3. Department of Infection Disease Control and Prevention, Xi'an Center for Disease Prevention and Control, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**Abstract: Objective** To investigate the relationship between the incidence of hand, foot and mouth disease (HFMD) and factors related to environment and socioeconomic in Xi'an at a spatial grid scale of 5 km, and provide a basis for the development of regional control and prevention measures. **Methods** The 2019 HFMD report data in Xi'an were collected and analyzed by spatial autocorrelation to characterize the spatial distribution. The role of natural environmental factors and socioeconomic factors on the incidence of HFMD was analyzed based on a multiscale geographically weighted regression (MGWR) model and compared with those of the ordinary least square (OLS) regression model and the geographically weighted regression (GWR) model. **Results** The annual reported incidence rate of HFMD in Xi'an in 2019

was 157.99/100,000, with a positive correlation in spatial distribution (global Moran's  $I = 0.349$ ,  $P < 0.001$ ). The MGWR model fit was better than the GWR model and the OLS model (MGWR:  $R^2 = 0.530$ ; GWR:  $R^2 = 0.473$ ; OLS:  $R^2 = 0.327$ ). On the scale of influence, the GDP, land urbanization level, and average temperature had larger scale effects, while normalized difference vegetation index (NDVI) had smaller scale influence. GDP was significantly negatively correlated with the reported incidence of HFMD, land urbanization level and average temperature were significantly positively correlated with the reported incidence, and NDVI had a significant negative effect on HFMD incidence in parts of Xi'an. **Conclusion** The influence of environmental and socioeconomic factors on the incidence of HFMD is significant and there are spatial differences in the role of each influencing factor. The results are helpful for the formulation of regional prevention and control strategies for HFMD.

**Key words:** Hand, foot and mouth disease; Spatial autocorrelation; Multi-scale geographically weighted regression; Geographically weighted regression; Xi'an

手足口病是一种常见的由肠道病毒引起的急性传染病,以手部、足部、臀部皮肤以及口腔黏膜出现皮疹或疱疹为典型临床症状,多发于 0~5 岁儿童群体,多数患者症状较轻<sup>[1]</sup>。因为该病传染性强、传播速度快且尚无特效药物可用,所以疫情防控难度较大。自 2008 年手足口病被列为丙类传染病进行管理以来,该病在全国范围内每年的报告病例数都在百万例以上<sup>[2]</sup>,2010 年以后,发病率更是长期居于我国法定传染病之首<sup>[3]</sup>。

研究证明手足口病分布存在空间聚集性<sup>[4-5]</sup>,且受到各种社会经济因素及环境因素的影响<sup>[6-8]</sup>。传统的线性回归模型不适于解决空间异质性问题,地理加权回归(geographically weighted regression, GWR)模型<sup>[9]</sup>在一定程度上能处理空间异质性问题,但是所有自变量使用统一的带宽(即构建局部回归时需要的周边数据点的数量),没有充分考虑各种影响因素作用尺度的不同。Fotheringham 等<sup>[10]</sup>对 GWR 模型做了进一步优化,提出了多尺度地理加权回归(multiscale geographically weighted regression, MGWR)模型,此模型可以赋予各个自变量独立的带宽,能更好地模拟自变量与因变量的空间响应过程,识别不同影响因素的空间尺度效应。目前, MGWR 模型在住宅价格和城市交通相关领域的影响机制分析上应用比较多<sup>[11-12]</sup>,也逐渐应用于公共卫生领域<sup>[13-14]</sup>,但在手足口病研究领域应用仍较少。

同时,以往手足口病相关的流行病学研究多以市、县作为基本地理单位<sup>[6,15-16]</sup>,研究对象的计算处理容易受到行政区划的不规则性的干扰,而空间网络分析可以有效避免这种现象<sup>[17]</sup>,此外,目前在更精细空间规模上的相关研究较少,无法满足精准防控的需求。本研究以 2019 年手足口病数据为例,基于西安市 5 km×5 km 的空间网格尺度,利用 MGWR

模型对手足口病发病影响因素进行探究,为制定更加精准的手足口病防控策略提供理论依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料来源

2019 年西安市全年的手足口病报告病例数据来自中国疾病预防控制中心信息系统;调用百度地图 API 获取报告病例现居地经纬度坐标;土地覆盖数据来源于 CLCD1990-2019 年全国土地覆盖数据<sup>[18]</sup>,以各个地理单位内不透水的土地占比反映土地城镇化水平;2019 年 GDP 数据及人口数据来源于资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>);同期的平均气温数据及归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)数据来源于国家地球系统科学数据中心(<http://www.geo-data.cn/>);基础地图数据来自国家基础地理信息系统(<http://www.ngcc.cn/ngcc/>),利用 ArcGIS10.8 中的渔网工具创建西安市 5 km×5 km 的网格地图。使用 ArcGIS10.8 中分区统计工具,对各网格内 2019 年的病例数据、人口数据以及 GDP 数据分别进行求和计算,土地城镇化水平、归一化植被指数以及平均气温等数据整理为各网格单位的年度均值,最后将分区统计数据与网格地图连接建立地理信息数据库。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 空间经验贝叶斯平滑

当空间单位内人口数较少时,病例数的变化会引起发病率的较大变化,空间经验贝叶斯平滑可以使可信度较低的估计向局部平均率靠近,减小不同人口规模所造成的偏倚,减小数据的空间变异性<sup>[19]</sup>。因此,使用空间经验贝叶斯平滑方法对各地理单位的手足口病报告发病率进行空间平滑。

### 1.2.2 空间自相关

采用全局 Moran's  $I$  分析空间经验贝叶斯平滑之后的手足口病报告发病率的空间自相关性。空间自相关分析技术常用于度量区域内各观测值之间的空间关联程度,通过对各观测值在研究区域内的分布进行相关性分析,判断是否存在空间聚集性<sup>[20]</sup>。

### 1.2.3 GWR 与 MGWR

基于方差膨胀因子 (variance inflation factor, VIF) 检查自变量共线性问题,剔除 VIF > 10 的自变量<sup>[21]</sup>。将最终变量纳入局部回归模型进行分析。GWR 模型将数据的空间位置信息考虑进回归模型之中,解决了传统线性回归模型所不能处理的空间异质性问题<sup>[9]</sup>,其公式如下:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^m \beta_k(u_i, v_i) X_{ik} + \varepsilon_i$$

式中:  $(u_i, v_i)$  为第  $i$  个网格处的坐标,  $y_i$  是网格  $i$  处的因变量;  $X_{ik}$  表示第  $k$  个影响因子在网格  $i$  处的观测值;  $\beta_0(u_i, v_i)$  为回归关系的截距项; 网格  $i$  处的第  $k$  个自变量的回归系数由  $\beta_k(u_i, v_i)$  表示, 基于核函数得到;  $\varepsilon_i$  代表独立的随机误差项。

相较于 GWR 模型, MGWR 模型最大的不同在于带宽, 带宽是指构建局部回归时需要的周边数据点的数量。MGWR 为模型中的每个关系生成单独的优化带宽, 顾及到不同影响因素的作用尺度差异, 结果更具稳定性和普适性<sup>[22]</sup>。其公式如下:

$$y_i = \beta_{b_{0k}}(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^m \beta_{b_{0k}}(u_i, v_i) X_{ik} + \varepsilon_i$$

式中:  $\beta_{b_{0k}}(u_i, v_i)$  为截距项;  $b_{0k}$  是模型为第  $k$  个回归关系校准的最优带宽; 网格  $i$  处的各个自变量的回归系数由  $\beta_{b_{0k}}(u_i, v_i)$  表示;  $\varepsilon_i$  代表随机误差项。

在构建 MGWR 模型及 GWR 模型时均对参数进行标准化处理, 选择自适应的 Bi-square 函数作为核函数, 带宽优化采用交叉验证法 (cross-validation, CV)。MGWR 模型中, 以回归系数变化值小于  $1 \times 10^{-5}$  作为判断模型收敛完成的标准。通过计算修正赤池信息准则 (Akaike's information criterion corrected, AICc)、决定系数 (coefficient of determination,  $R^2$ ) 以及残差平方和 (residual sum of squares, RSS) 来评估模型拟合优度。

### 1.3 统计学处理

采用 Geoda 1.16 软件进行空间经验贝叶斯平滑; 采用 MGWR 2.2 软件实现 MGWR 模型、GWR 模型以及 OLS 模型的构建。检验水准  $\alpha = 0.05$ , 双侧检验。

## 2 结果

### 2.1 描述性分析

2019 年西安市手足口病报告病例数 16 121 例, 年报告发病率为 157.99/10 万。所有地理单位对应的影响因素数据的描述见表 1。GDP、土地城镇化水平、平均气温、NDVI 等因素的分布均存在区域差异。

表 1 影响因素变量描述

变量	平均值	最小值	最大值	标准差
GDP/(亿元)	19.433	0.040	847.764	71.415
土地城镇化水平/%	12.838	0.000	99.147	21.394
平均气温/°C	11.481	0.307	15.115	3.183
归一化植被指数	0.516	0.224	0.684	0.108

### 2.2 空间自相关分析结果

结果显示, 全局 Moran's  $I$  为 0.349 ( $P < 0.001$ ,  $Z = 17.574$ ), 说明 2019 年西安市手足口病发病存在显著空间正相关, 区域报告发病率存在空间聚集性。

### 2.3 模型对比结果

多重共线性检验结果显示, 所有自变量的 VIF 值范围为 2.188 ~ 4.843 (GDP: 2.188; 土地城镇化水平: 4.843; 平均气温: 1.765; 归一化植被指数: 3.747), 可认为自变量间多重共线性在可接受范围内。相较于 OLS 模型和 GWR 模型, MGWR 模型的  $R^2$  更高, AICc 值及残差平方和也更低, 说明 MGWR 模型能更好地解释各影响因素对手足口病报告发病率的影响程度, 见表 2。

表 2 模型指标比较

模型参数	OLS	GWR	MGWR
$R^2$	0.327	0.473	0.530
AICc	1 609.084	1 510.858	1 468.410
RSS	440.124	344.913	307.181

各个影响因素的带宽如表 3 所示, GDP 的最优带宽为 510, 土地城镇化水平的最优带宽为 651, 平均气温的最优带宽为 653, 归一化植被指数作用尺度较小为 240。

表 3 GWR 与 MGWR 模型各变量带宽

变量	GWR	MGWR
截距	158	43
GDP	158	510
土地城镇化水平	158	651
平均气温	158	653
归一化植被指数	158	240

### 2.4 影响因素分析结果

MGWR 模型结果显示 (表 4), GDP、土地城镇

化水平以及平均气温等变量的回归系数整体显著,NDVI的回归系数局部显著。GDP与手足口病报告发病率呈负相关关系,各地理单位回归系数值差异较小;土地城镇化水平在整个地区内与手足口病发病呈正相关关系,回归系数绝对值大于

其他因素,对手足口病报告发病率的影响更明显;平均气温对整个地区的手足口病的报告发病率均起着促进作用;各地理单位间NDVI回归系数值差异相对较大,在部分地区对手足口病发病率具有显著负向影响。

表4 影响因素的MGWR参数估计结果统计  
Table 4 Statistics of estimation results of MGWR for factors

变量	参数统计				显著系数比例		
	最小值	最大值	平均值	标准差	$P < 0.05 / \%$	+ / %	- / %
GDP	-0.423	-0.408	-0.415	0.004	100.000	0.000	100.000
土地城镇化水平	0.963	0.981	0.971	0.005	100.000	100.000	0.000
平均气温	0.122	0.162	0.142	0.014	96.024	100.000	0.000
归一化植被指数	-0.283	0.275	0.043	0.173	16.820	0.000	100.000

$P < 0.05 / \%$ :显著系数所占比例;+ / %:显著系数中正值占比;- / %:显著系数中负值占比。

### 3 讨论

本研究在较精细的空间尺度上对2019年西安市手足口病资料进行了全局空间自相关分析,发现西安市手足口病报告发病率的分布具有空间自相关性。进一步使用MGWR模型探索了环境与社会经济因素对手足口病发病的影响,该模型的优势在于考虑到了不同因素的作用尺度差异。

MGWR模型整体优于GWR模型和OLS模型。MGWR模型可以准确地区分具有高空间异质性的参数表面和具有低空间异质性的参数表面,允许每个参数表面具有不同程度的空间变化,因此该模型能够通过每个自变量的不同带宽来指示不同关系如何在不同的空间尺度上运行,并产生更准确的局部参数估计<sup>[10]</sup>。带宽越大说明影响因素在不同区域作用的差异越小,即回归系数值在各区域的差别越小。相较于GWR模型,MGWR模型结果更接近真实情况的空作用过程,进一步提高了模型拟合度<sup>[11]</sup>,可用于HFMD报告发病率影响因素的探索。

MGWR模型结果显示,GDP与手足口病报告发病率呈显著负相关,回归系数的空间差异不大,其影响在空间上具有平稳性。一般而言,经济水平高的地区,公共卫生事业的发展会得到更多的物质保障,医疗卫生条件及疾病防控措施也会更完善,人们的卫生意识也更强,这些都助于降低感染手足口病的可能性。He等<sup>[23]</sup>在深圳开展的一项研究提示经济水平的提升,一定程度上可以降低手足口病的感染风险。

相较于其他影响因素,土地城镇化水平在各区域的回归系数绝对值较大,对手足口病报告发病率的影响程度相对更大,表现为正向影响,影响在空间上分布较平稳。通常而言,土地城镇化水平高的地

区人口也更为密集,拥挤的环境以及人与人之间密切接触会增加易感人群暴露于传染源的风险,促进疾病的传播<sup>[24]</sup>。丘文洋等<sup>[25]</sup>在山东省进行的研究也显示人工土地利用比例越高,手足口病发病风险越高。这提示我们,城镇化水平高且人口密集的地区是手足口病防控的重点地区,尤其是发展较快但卫生条件较差的城乡结合部,应投入更多的资源用于疾病防控工作。

平均温度与手足口病发病存在正相关,影响在空间上分布较平稳。既往研究也发现温度的升高与手足口发病率的上升有关<sup>[6,26]</sup>。可能是因为较高的气温会增加易感人群接触感染者或者受污染环境的机会,从而加快了疾病传播进程,Luan等<sup>[27]</sup>的研究也证实高温会使得手足口病传播速度加快。

以往的研究中,有关NDVI与手足口病关联的研究较少。Cao等<sup>[28]</sup>在深圳进行的一项研究显示植被密度与手足口病报告发病率的降低显著相关。本研究发现NDVI对手足口病的影响在大部分地区不显著,仅在部分区域表现为显著负相关,这种负相关可能是因为高NDVI区居住人口较少,疾病传播风险较小,这也提示我们在疾病防控上应更加关注NDVI较低的城市地区。

本文存在一定局限性。①研究为生态学研究设计,难以避免混杂因素的影响,可能存在生态学谬误;②考虑到新冠疫情流行对于国民经济、人口流动的影响,为更准确分析社会经济因素对手足口病流行的空间效应差异,选择采用新冠疫情之前的2019年数据为例进行研究,结果可能对其他时段的代表性不强,后续可进一步对多个时间段的数据进行分析来提高结果的代表性;③研究中用到的环境因素数据为年度均值,忽略了时间维度的波动,后续可从更细时间尺度进行分析;④手足口的发病受多种因

素的影响,如空气污染<sup>[29]</sup>、疫苗接种<sup>[30]</sup>、室内环境因素<sup>[31]</sup>等,本研究选取的影响因素较为局限,以后应考虑更多方面的因素进行研究。

综上所述,2019年西安市手足口病报告发病率分布存在空间聚集性。相较于GWR模型和OLS模型,MGWR模型在HFMD发病影响因素探索方面表现更好。GDP、土地城镇化水平、平均温度、NDVI等对手足口病发病的影响在不同地区存在差异,研究结果有助于不同地区综合考虑发病情况及影响因素效应,进一步改进防控措施。

## 参考文献:

- [1] 郭艳立. 手足口病的流行病学及病原学特征研究进展[J]. 医疗装备, 2020, 33(10): 201-203.  
GUO Yanli. Research progress on epidemiology and pathogenic characteristics of hand, foot and mouth disease[J]. Medical Equipment, 2020, 33(10): 201-203.
- [2] 李颀, 郑步云, 王劲峰. 2008—2018年中国手足口病时空分异特征[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(3): 419-430.  
LI Jie, ZHENG Buyun, WANG Jinfeng. Spatial-temporal Heterogeneity of Hand, Foot and Mouth Disease in China from 2008 to 2018[J]. Journal of Geo-information Science, 2021, 23(3): 419-430.
- [3] 王小莉, 魏洪鑫, 贾蕾, 等. 我国手足口病经济负担研究概况[J]. 中华流行病学杂志, 2020, 41(2): 273-279.  
WANG Xiaoli, WEI Hongxin, JIA Lei, et al. Summary of research in economic burden of hand, foot, and mouth disease in China[J]. Chinese Journal of Epidemiology, 2020, 41(2): 273-279.
- [4] 白尧, 王戩, 杨凡, 等. 2014—2019年西安市手足口病聚集性疫情流行特征分析[J]. 预防医学情报杂志, 2020, 36(12): 1566-1571.  
BAI Yao, WANG Jian, YANG Fan, et al. Analysis on the epidemiological characteristics of clustered cases of hand-foot-mouth disease in Xi'an from 2014 to 2019[J]. Journal of Preventive Medicine Information, 2020, 36(12): 1566-1571.
- [5] 别芹芹, 邱冬生, 胡辉, 等. 我国手足口病时空分布特征的GIS分析[J]. 地球信息科学学报, 2010, 12(3): 380-384.  
BIE Qinqin, QIU Dongsheng, HU Hui, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of hand-foot-mouth disease in China[J]. Journal of Geo-Information Science, 2010, 12(3): 380-384.
- [6] 陈昕, 谢玲, 刘素红, 等. 广西手足口病时空分异及其地理环境因子探测分析[J]. 世界地理研究, 2022, 31(5): 1108-1118.  
CHEN Xin, XIE Ling, LIU Suhong, et al. Spatio-temporal difference and geographical environment factors of hand, foot and mouth disease in Guangxi[J]. World Regional Studies, 2022, 31(5): 1108-1118.
- [7] 龚胜生, 王无为, 陈红缨, 等. 湖北省手足口病流行的地理特征及其影响因子[J]. 地理科学, 2020, 40(6): 999-1009.  
GONG Shengsheng, WANG Wuwei, CHEN Hongying, et al. Geographical characteristics and influencing factors of the prevalence of hand, foot and mouth disease in Hubei Province[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(6): 999-1009.
- [8] 王雅婷, 朋文佳, 苏华林, 等. 2011—2018年中国手足口病发病的时空特征及影响因素研究[J]. 中华流行病学杂志, 2022, 43(10): 1562-1567.  
WANG Yating, PENG Wenjia, SU Hualin, et al. Spatiotemporal characteristics of hand, foot and mouth disease and influencing factors in China from 2011 to 2018[J]. Chinese Journal of Epidemiology, 2022, 43(10): 1562-1567.
- [9] Brunson C, Fotheringham AS, Charlton ME. Geographically weighted regression: a method for exploring spatial nonstationarity[J]. Geogr Anal, 1996, 28(4): 281-298.
- [10] Fotheringham AS, Oshan TM, Li ZQ. Multiscale Geographically Weighted Regression[M]. Boca Raton: CRC Press, 2023. doi: 10.1201/9781003435464.
- [11] 沈体雁, 于瀚辰, 周麟, 等. 北京市二手住宅价格影响机制: 基于多尺度地理加权回归模型(MGWR)的研究[J]. 经济地理, 2020, 40(3): 75-83.  
SHEN Tiyan, YU Hanchen, ZHOU Lin, et al. On hedonic price of second-hand houses in Beijing based on multi-scale geographically weighted regression: scale law of spatial heterogeneity[J]. Economic Geography, 2020, 40(3): 75-83.
- [12] 黄颀昊, 杨新苗, 岳锦涛. 基于多尺度地理加权回归模型的城市道路骑行流量分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(7): 1132-1141.  
HUANG Yonghao, YANG Xinmiao, YUE Jintao. Urban street bicycle flow analysis based on multi-scale geographically weighted regression model[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2022, 62(7): 1132-1141.
- [13] Lotfata A. Using geographically weighted models to explore obesity prevalence association with air temperature, socioeconomic factors, and unhealthy behavior in the USA[J]. J Geovisualization Spatial Anal, 2022, 6(1): 14.
- [14] Oshan TM, Smith JP, Fotheringham AS. Targeting the spatial context of obesity determinants via multiscale geographically weighted regression[J]. Int J Health Geogr, 2020, 19(1): 11.

- [15] Xu CD. Spatio-temporal pattern and risk factor analysis of hand, foot and mouth disease associated with under-five morbidity in the Beijing-Tianjin-Hebei region of China[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2017, 14(4): 416.
- [16] Hu BS, Qiu WQ, Xu CD, et al. Integration of a Kalman filter in the geographically weighted regression for modeling the transmission of hand, foot and mouth disease [J]. *BMC Public Health*, 2020, 20(1): 479.
- [17] Ren HY, Zheng L, Li QX, et al. Exploring determinants of spatial variations in the dengue fever epidemic using geographically weighted regression model: a case study in the joint Guangzhou-foshan area, China, 2014[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2017, 14(12): 1518.
- [18] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. *Earth Syst Sci Data*, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [19] Marshall RJ. Mapping disease and mortality rates using empirical Bayes estimators[J]. *J R Stat Soc Ser C Appl Stat*, 1991, 40(2): 283-294.
- [20] 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 Jingjing, ZHANG Tiewei, LI Xiuyang. Research progress on spatiotemporal clustering of disease[J]. *Chinese Journal of Epidemiology*, 2020, 41(7): 1165-1170.
- [21] 张雷雨, 杨毅, 梁霄. 地理加权回归模型的多重共线性诊断方法 [J]. *测绘与空间地理信息*, 2017, 40(10): 28-31. ZHANG Leiyu, YANG Yi, LIANG Xiao. The diagnostic approach of multicollinearity in geographically weighted regression model[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2017, 40(10): 28-31.
- [22] Wolf LJ, Oshan TM, Fotheringham AS. Single and multiscale models of process spatial heterogeneity[J]. *Geogr Anal*, 2018, 50(3): 223-246.
- [23] He XY, Dong SJ, Li LP, et al. Using a Bayesian spatio-temporal model to identify the influencing factors and high-risk areas of hand, foot and mouth disease (HFMD) in Shenzhen[J]. *PLoS Negl Trop Dis*, 2020, 14(3): e0008085. doi:10.1371/journal.pntd.0008085.
- [24] Tong MX, Hansen A, Hanson-Easey S, et al. Infectious diseases, urbanization and climate change: challenges in future China[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2015, 12(9): 11025-11036.
- [25] 丘文洋, 李连发, 张杰昊, 等. 利用空间聚集的贝叶斯网络评估手足口病发病风险[J]. *地球信息科学学报*, 2017, 19(8): 1036-1048. QIU Wenyang, LI Lianfa, ZHANG Jiehao, et al. A Bayesian network method considering spatial cluster to evaluate health risk of hand, foot and mouth disease[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2017, 19(8): 1036-1048.
- [26] Li CH, Mao JJ, Wu YJ, et al. Combined impacts of environmental and socioeconomic covariates on HFMD risk in China: a spatiotemporal heterogeneous perspective [J]. *PLoS Negl Trop Dis*, 2023, 17(5): e0011286. doi:10.1371/journal.pntd.0011286.
- [27] Luan GJ, Liu SN, Zhang WY, et al. Estimating the influence of high temperature on hand, foot, and mouth disease incidence in China[J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2023, 30(1): 1477-1484.
- [28] Cao CX, Li GH, Zheng S, et al. Research on the environmental impact factors of Hand-Foot-Mouth Disease in Shenzhen, China using RS and GIS technologies [C]// IEEE. 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Munich: IEEE, 2012: 7240-7243. doi:10.1109/IGARSS.2012.6351991.
- [29] 罗晓风, 湛柳华, 周文, 等. 2010—2011年广州市越秀区手足口病发例数与气象因素和空气污染指数的相关性分析[J]. *中国药物经济学*, 2013, 8(S3): 182-184. LUO Xiaofeng, ZHAN Lihua, ZHOU Wen, et al. Correlation analysis between the number of cases of hand-foot-mouth disease and meteorological factors and air pollution index in Yuexiu District of Guangzhou from 2010 to 2011[J]. *China Journal of Pharmaceutical Economics*, 2013, 8(S3): 182-184.
- [30] 梁兆毅, 孟君, 张艳炜, 等. 深圳市 2008—2020 年手足口病流行特征及 EV71 疫苗接种对其发病率影响 [J]. *中国公共卫生*, 2023, 39(2): 249-252. LIANG Zhaoyi, MENG Jun, ZHANG Yanwei, et al. Epidemiological characteristics of hand, foot and mouth disease in Shenzhen from 2008 to 2020 and effect of inactivated EV71 vaccine on disease incidence [J]. *Chin J Public Health*, 2023, 39(2): 249-252.
- [31] 吴晓娜, 孙琰, 贾蕾, 等. 室内环境因素和手足口病暴发的相关性研究 [J]. *中华疾病控制杂志*, 2012, 16(3): 234-236. WU Xiaona, SUN Ying, JIA Lei, et al. Study on the relationship between indoor environment and outbreaks of hand-foot-mouth disease[J]. *Chinese Journal of Disease Control & Prevention*, 2012, 16(3): 234-236.

(编辑:房红娟)