

DOI: 10. 12138/j. issn. 1671-9638. 20256778

· 论 著 ·

## 气象因素对中国大陆手足口病影响的时空异质特征探究

陈 庚<sup>1</sup>, 张辉国<sup>1</sup>, 黄蕊芳<sup>2</sup>

(1. 新疆大学数学与系统科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830017; 2. 新疆维吾尔自治区疾病预防控制中心, 新疆 乌鲁木齐 830002)

**[摘要]** **目的** 探究气象因素对中国大陆手足口病(HFMD)发病率影响的区域差异和季节演变特征,为不同省份应对季节变化制定 HFMD 的预防和控制措施提供理论支撑。**方法** 收集 2011 年 1 月—2020 年 12 月中国大陆 31 个省份(不包括港澳台地区)的 HFMD 发病率数据和相应的气象数据,采用时空地理加权回归(GTWR)模型对气象因素影响 HFMD 发病率的区域差异和季节特征进行量化分析。**结果** 2011—2020 年中国大陆 HFMD 年发病率具有周期性,且偶数年发病率高于奇数年,整体呈现出先上升后下降的变化趋势。各省份 HFMD 发病率具有显著的季节特征,5—7 月和 9—10 月为高发月份。HFMD 的高发省份主要集中在南部地区,并且各省份的 HFMD 发病率具有显著的空间集聚特征。GTWR 模型的结果表明,平均风速对内蒙古、北京以及东北地区的 HFMD 发病率具有促进作用,对其他省份发病率具有抑制作用,且在区域上呈现出由西南地区向外发散减弱的演变特征,在季节上呈现出“抛物线”型的变化趋势。除黑龙江和吉林外,平均气温和累计降水对各省份 HFMD 发病率均具有促进作用,在区域上均呈现出由南向北逐渐减弱的变化特征,在季节上平均风速的影响呈现出“M”型的变化特征,累计降水的影响呈现出“W”型的变化特征。累计日照对各省份 HFMD 发病率的影响均表现为抑制作用,在区域上呈现出由东南向西北逐渐减弱的变化特征,在季节上呈现出“U”型的变化特征。**结论** 气象因素对中国大陆 HFMD 发病率的影响具有明显的时空异质特征,建议不同省份制定不同的 HFMD 防控措施应对季节变化,以有效降低 HFMD 的发病率。

**[关键词]** 气象因素; 手足口病; 区域差异性; 季节特征; GTWR 模型

**[中图分类号]** R181.3<sup>+</sup>2

## Spatiotemporal heterogeneity of meteorological factors on the incidence of hand-foot-and-mouth disease in the mainland of China

CHEN Geng<sup>1</sup>, ZHANG Huiguo<sup>1</sup>, HUANG Rui Fang<sup>2</sup> (1. College of Mathematics and System Science, Xinjiang University, Urumqi 830017, China; 2. Xinjiang Uygur Autonomous Region Center for Disease Control and Prevention, Urumqi 830002, China)

**[Abstract]** **Objective** To explore the regional differences and seasonal evolution characteristics of the impact of meteorological factors on the incidence of hand-foot-and-mouth disease (HFMD) in the mainland of China, and provide theoretical support for different provinces to develop HFMD prevention and control measures in response to seasonal changes. **Methods** HFMD incidence data and corresponding meteorological data across 31 provinces in the mainland of China (excluding Hong Kong, Macao, and Taiwan) from January 2011 to December 2020 were collected. The geographically and temporally weighted regression (GTWR) model was employed to quantitatively analyze the regional differences and seasonality of meteorological impacts on HFMD incidence. **Results** From 2011 to 2020, the average annual incidence of HFMD in the mainland of China displayed periodicity with even years a higher inci-

[收稿日期] 2024-07-17

[基金项目] 国家自然科学基金地区项目(11961065);新疆自然科学基金项目(2023D01C01);教育部人文社会科学研究规划基金项目(19YJA910007)

[作者简介] 陈庚(2001-),男(汉族),河南省太康县人,硕士研究生在读,主要从事时空统计模型的结构识别和变量选择及其应用研究。

[通信作者] 张辉国 E-mail: zhanghg@xju.edu.cn

dence than odd years, and an initial increase followed by a decreasing trend. The incidence in different provinces showed significant seasonal characteristics, peaking from May to July and September to October. High-incidence provinces of HFMD were predominantly located in the southern region, and exhibiting significant spatial clustering characteristics of HFMD in each province. GTWR model analysis results indicated that the average wind speed promoted the incidence of HFMD in Inner Mongolia, Beijing, and the northeastern region, but inhibited the incidence in other provinces. In addition, the regional evolution characteristics of the average wind speed were divergent and weakened from southwest China, showing a “parabolic” changing trend in seasonality. Except for Heilongjiang and Jilin, the average temperature and cumulative precipitation generally promoted HFMD incidence of each province, presenting regional changing characteristics of weakening gradually from south to north, as well as “M”-shaped seasonal effects of wind speed and “W”-shaped effects of cumulative precipitation. Cumulative sunlight exposure had an inhibitory effect on HFMD incidence of each province, presenting regional characteristics of weakening gradually from southeast to northwest and a “U”-shaped seasonal pattern. **Conclusion** The impact of meteorological factors on HFMD incidence in the mainland of China exhibits significant spatiotemporal heterogeneity. It is recommended that different provinces formulate distinct HFMD prevention and control measures in response to seasonal changes, so as to reduce the incidence of HFMD effectively.

[**Key words**] meteorological factor; hand-foot-and-mouth disease; regional difference; seasonal characteristics; GTWR model

手足口病(hand-foot-and-mouth disease, HFMD)是一种主要由 EV71 型和 Cox A16 型肠道病毒感染引起的且具有一定程度致死率的传染性疾病,多发于 5 岁以下婴幼儿人群,主要症状为手、足、口腔等部位出现皮疹、疱疹,以及全身发热,重症病例可能引发多种并发症疾病,如脑膜炎、脑炎、急性弛缓性麻痹、呼吸道感染和心肌炎等<sup>[1]</sup>。自 2008 年 5 月 HFMD 被列入丙类传染病管理条例<sup>[2]</sup>以来,一直是我国重要的公共卫生问题。

研究表明, HFMD 发病率具有明显的时空异质性<sup>[3]</sup>,主要表现为季节特征<sup>[4-6]</sup>和区域差异<sup>[7]</sup>,并且不同区域发病率的季节特征同样存在差异性<sup>[8]</sup>。世界卫生组织(WHO)指出气候变化已经成为全球公共卫生面临的主要威胁之一<sup>[9]</sup>。气候变化不仅是影响 HFMD 发病率的重要因素<sup>[10-12]</sup>,也是造成 HFMD 发病率具有季节特征和区域差异的主要原因<sup>[13]</sup>。中国幅员辽阔,气候条件差异大,不同省份 HFMD 发病率受气象因素的影响不一致<sup>[14]</sup>且因季节而异<sup>[15]</sup>。虽然已有许多关于气象因素对 HFMD 发病率影响的研究,但大多都集中在省或市较小的空间尺度上<sup>[16-17]</sup>,得到的研究结果只针对某一区域。常用来分析气象因素对 HFMD 发病率影响特征的多元线性回归(OLS)模型<sup>[18]</sup>和地理加权回归(GWR)模型<sup>[14]</sup>等虽然能够在一定程度上拟合气象因素与 HFMD 发病率之间的回归关系,但由于不能将时空数据的空间和时间属性同时纳入到回归关系中,因此无法准确捕捉到回归关系的时空变化特征。时空地理加权回

归(geographically and temporally weighted regression, GTWR)模型能够有效解决这一问题,同时对解释变量与响应变量之间回归关系在空间和时间上的变化特征,进行量化评估。因此,采用 GTWR 模型探究气象因素对中国大陆 31 个省份 HFMD 发病率影响的时空变化特征,将有助于为各省份制定适应季节气候变化的 HFMD 预防和控制措施提供更准确的理论支撑。本研究采用中国 31 个省份 2011—2020 年各个月份的 HFMD 发病率数据,并选取平均风速、平均气温、累计日照和累计降水 4 个气象因素作为 HFMD 发病率的驱动因子,基于 GTWR 模型探究气象因素对中国大陆 HFMD 发病率影响的时空异质特征,为各省份在不同季节制定预防和控制 HFMD 发病率的措施提供理论支持。

## 1 资料与方法

1.1 数据来源与处理 2011—2020 年中国大陆 31 个省份(不包括港澳台地区)逐月 HFMD 发病率(/10 万)数据来源于中国疾病预防控制中心公共卫生科学数据中心(<https://www.phsciencedata.cn/>)。平均风速(m/s)、平均气温(°C)、累计日照(h)和累计降水(mm)4 个气象因素数据来源于美国国家海洋和大气管理局(NOAA)下设的国家环境中心(<https://www.ncsl.noaa.gov/data/global-summary-of-the-day/archive/>),下载得到的原始气象数据为全球范围内逐日气象观测站数据。因此,

首先提取中国范围内 2011 年 1 月 1 日—2020 年 12 月 31 日气象站点数据并进行单位转换。基于中国范围内所有气象站点的数据,采用反距离权重法插值得到全国逐日气象栅格数据(空间分辨率为 1 km,时间分辨率为 1 d)。基于从国家地理信息公共服务平台(天地图,https://cloudcenter.tianditu.gov.cn/administrativeDivision)下载得到的省级行政边界矢量图对省级行政边界范围内的气象数据进行平均化处理,将平均化后的数据作为省份逐日气象数据。最后在每个省份行政区域上将每个月份的数据进行求和,得到省份逐月气象数据。研究中涉及到的所有行政区域矢量图的审图号均为 GS(2024)0650,坐标系为 GCS\_WGS\_1984,底图边界均无修改。

### 1.2 研究方法

1.2.1 集中度分析 为探究 HFMD 发病率的季节特征,采用集中度评估各月份发病率在一年中的集中程度,其计算公式为

$$C_x = \frac{1}{2} (c_2 + c_6 - c_8 - c_{12}) + \frac{\sqrt{3}}{2} (c_3 + c_5 - c_9 - c_{11}) + (c_4 - c_{10}) \quad (1)$$

$$C_y = \frac{1}{2} (c_3 - c_5 - c_9 + c_{11}) + \frac{\sqrt{3}}{2} (c_2 - c_6 - c_8 + c_{12}) + (c_1 - c_7) \quad (2)$$

$$M = \sqrt{\frac{C_x^2 + C_y^2}{n}} \quad (3)$$

式中: $C_i$  表示某月 HFMD 发病率的全年占比; $i$  表示月份; $C_x$  表示  $x$  轴方向的离散度; $C_y$  表示  $y$  轴方向的离散度; $M$  为集中度,取值范围是(0, 1), $M$  值越接近 0 表示发病情况在 12 个月中分布越均匀,越接近 1 说明发病情况越集中在某 1 个月内。

1.2.2 全局 Moran's I 指数 全局 Moran's I 指数是用于反映研究区域范围内所有省份 HFMD 发病率的整体空间自相关性的统计量,其计算公式如下所示。

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \right) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

式中: $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ ,  $x_i$  表示省份  $i$  的 HFMD 发病率, $n = 31$  表示省份数, $W_{ij}$  为空间邻接矩阵  $W = (W_{ij})_{n \times n}$  的元素,反映省份  $i$  与  $j$  省份之间的邻接关系。Moran's I 的取值范围为  $[-1, 1]$ ,越接近 1,表示省份间 HFMD 发病率的空间正相关程度越强;越接近 -1,表示空间负相关程度越强;接近 0 表示不存在空间自相关性。

1.2.3 局部 Moran's I 指数 局部 Moran's I 指数用于评估研究区域内每个省份与其邻近省份之间的局部空间自相关性,能够反映出那些区域存在显著的空间集聚或分散特征。其计算公式如下所示。

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2} \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (5)$$

式中: $x_j$  表示省份  $j$  的 HFMD 发病率, $I_i$  表示省份  $i$  的局部 Moran's I 值,正的  $I_i$  表示该省份与相邻省份的 HFMD 发病率具有“高-高”热点或“低-低”冷点集聚的特征,负的  $I_i$  表示具有“高-低”或“低-高”的集聚特征。本文中计算 HFMD 发病率的全局和局部 Moran's I 值时,采用的是各省份的年发病率数据。

1.2.4 时空地理加权回归模型 GTWR 模型通过将数据的空间和时间属性纳入到回归关系中,能够有效捕捉到解释变量对响应变量影响的时空变化特征,因此本文采用 GTWR 模型同时探究气象因素对 HFMD 发病率影响的区域差异和季节变化特征。GTWR 模型的形式可以表示为

$$HFMD_{ij} = \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i, v_i, t_j) x_{ijk} + \epsilon_{ij}, i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, T. \quad (6)$$

(6) 式中  $HFMD_{ij}$  表示省份  $i$  的第  $j$  个月份的 HFMD 发病率, $x_{ijk}$  表示省份  $i$  的第  $k$  个气象因素在第  $j$  个月份的观测值, $\beta_k(u_i, v_i, t_j)$  表示省份  $i$  的第  $k$  个气象因素在第  $j$  个月份的回归系数, $(u_i, v_i, t_j)$  表示省份  $i$  在第  $j$  个月份的时空坐标, $\epsilon_{ij}$  表示随机扰动项, $n = 31$  表示省份数, $T = 120$  表示月份数。省份  $i$  的气象因素在第  $j$  个月份的系数估计值的表达式为

$$\hat{\beta}(u_i, v_i, t_j) = (X^T W_{ij}^{ST} X)^{-1} X^T W_{ij}^{ST} Y \quad (7)$$

$\hat{\beta}(u_i, v_i, t_j)$  的大小和正负表征了气象因素对省份  $i$  的第  $j$  个月份的 HFMD 发病率的影响程度和方式,估计值为正表明气象因素对 HFMD 发病率具有促进作用,估计值为负则表明具有抑制作用,估计值为 0 表明没有影响。

$$W_{ij}^{ST} = \begin{pmatrix} w_{ij}(1,1) & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & w_{ij}(n,1) & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & w_{ij}(1,T) \\ & & & & & \ddots \\ & & & & & & w_{ij}(n,T) \end{pmatrix}_{nT \times nT} \quad (8)$$

(8) 式表示时空权重矩阵,其中元素  $w_{ij}(l, r)$  ( $l = 1, 2, \dots, n; r = 1, 2, \dots, T$ ) 表示省份  $i$  在第  $j$  个月份与省份  $l$  在第  $r$  个月份之间的权重,通常由基

于时空距离衰减的核函数得到。本研究中采用 Bi-square 核函数计算时空权重矩阵中的元素,其表达式可表示为

$$w_{ij}(l,r)=\begin{cases} 1-\left[\left(\frac{d_{ij}^S(l,r)}{h_S}\right)^2+\left(\frac{d_{ij}^T(l,r)}{h_T}\right)^2\right], & 1\geq\left[\left(\frac{d_{ij}^S(l,r)}{h_S}\right)^2+\left(\frac{d_{ij}^T(l,r)}{h_T}\right)^2\right] \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (9)$$

(9)式中  $d_{ij}^S(l,r)$  和  $d_{ij}^T(l,r)$  分别表示时空坐标  $(u_i, v_i, t_{ij})$  和  $(u_l, v_l, t_r)$  之间的空间距离和时间距离,  $h_S$  和  $h_T$  分别表示空间和时间窗宽。最后采用评估模型性能的修正赤池信息量准则 (corrected Akaike information criterion, AICc) 选取最优窗宽。

## 2 结果

### 2.1 HFMD 发病率变化特征

2.1.1 年份变化和地区分布特征 2011—2019 年各省份 HFMD 发病率整体先上升后下降, 2014 年出现发病率峰值。2015—2019 年大部分省份发病率呈现波动下降但整体变化幅度不大, 2020 年所有省份 HFMD 发病率均大幅度下降。各省份 HFMD 发病率呈现出一定的周期性, 且有偶数年份发病率高于奇数年发病率的特征。见图 1。

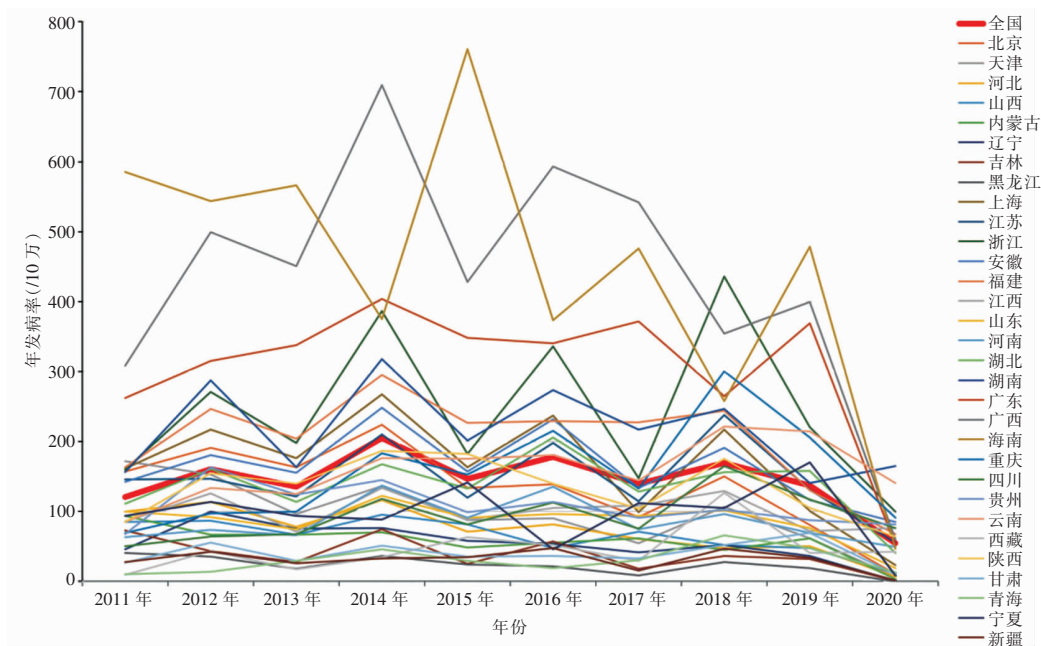


图 1 2011—2020 年中国大陆及各省份 HFMD 年发病率

Figure 1 Annual incidence of HFMD in the mainland of China and each province, 2011 - 2020

2.1.2 季节变化特征 2011—2020 年全国 HFMD 发病率的集中度值为 0.329~0.721, 说明各年份发病率均具有明显的季节特征, 整体呈现出波动上升的变化趋势, 且 2020 年季节特征最为显著, 集中度值达到 0.721, 2016 年季节性最弱, 见表 1。各省份 HFMD 发病率具有明显的季节性变化

特征。一年中各省份发病率整体上呈现出“双峰”分布特征, 主高峰出现在 5—7 月份, 次高峰出现在 9—10 月份。整体来看各省份发病率的季节性变化趋势基本一致, 3—6 月份和 9—11 月份属于发病率的上升期, 7—8 月份和 12 月份至次年 2 月份属于发病率的下降期。见图 2。

表 1 2011—2020 年中国大陆 HFMD 发病率季节集中度分析结果

Table 1 Seasonal concentration of HFMD incidence in the mainland of China, 2011 - 2020

年份	集中度	年份	集中度	年份	集中度
2011	0.337	2014	0.394	2017	0.341
2012	0.356	2015	0.345	2018	0.404
2013	0.340	2016	0.329	2019	0.415
				2020	0.721

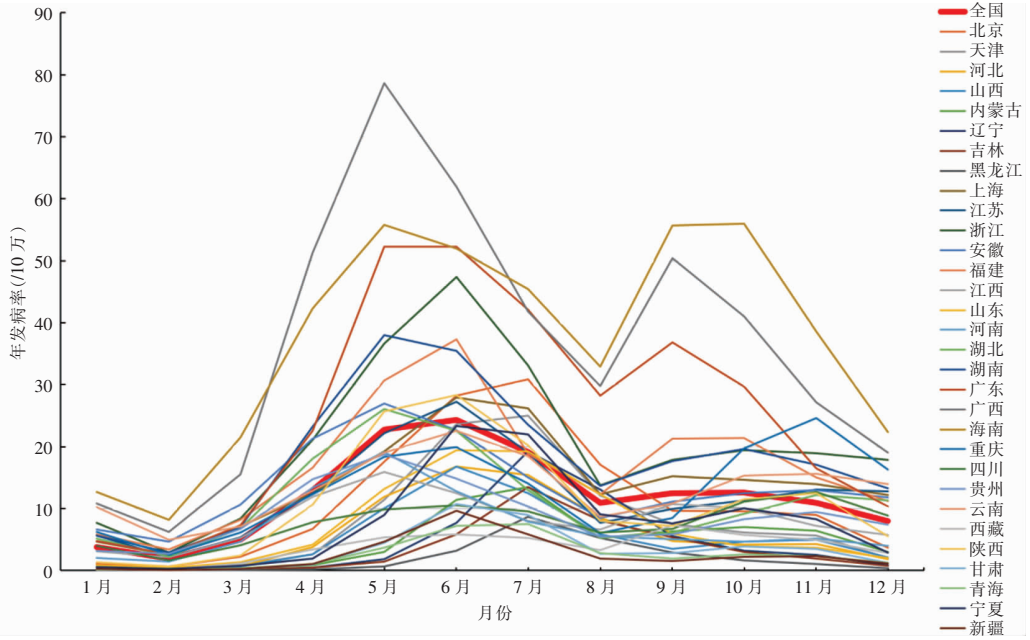


图 2 2011—2020 年中国大陆及各省份 HFMD 月平均发病率

Figure 2 The average monthly incidence of HFMD in the mainland of China and each province, 2011 – 2020

2.1.3 空间分布特征 从各省份 HFMD 2011、2014、2017、2020 年的发病率看，HFMD 的高发省份主要集中在南部沿海地区，发病率呈现出由南向北逐渐降低的空间分布格局。南部地区的发病率高

于西部、北部和东北部地区，特别是南部沿海地区（如海南、广东、福建和广西等）常年为 HFMD 的高发省份。近年来 HFMD 的高发省份呈现出向中部地区转移的空间变化趋势。见图 3。

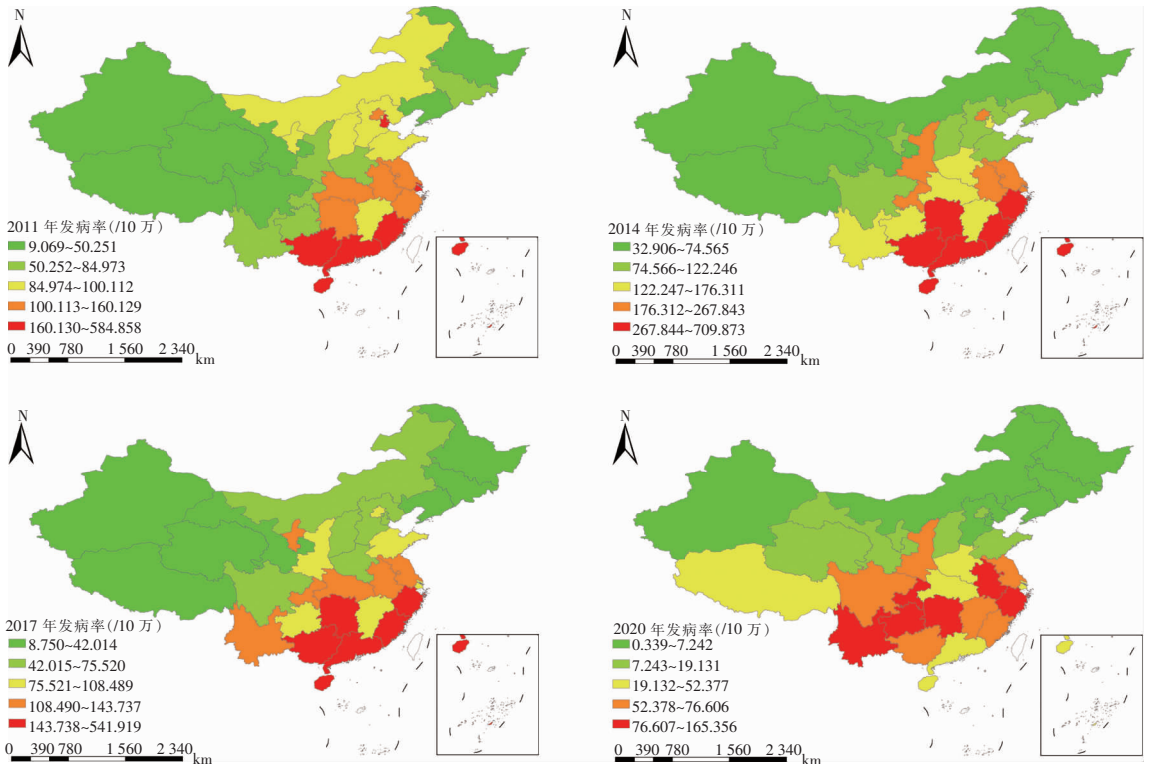


图 3 2011、2014、2017、2020 年中国大陆各省份 HFMD 发病率空间分布特征

Figure 3 Spatial distribution characteristics of HFMD incidence in each province of the mainland of China in 2011, 2014, 2017 and 2020

## 2.2 HFMD 空间集聚及动态演变特征

2.2.1 全局 Moran's I 分析 2011—2020 年 HFMD 发病率的 Moran's I 值均  $>0.4$  并且都通过了显著性检验,说明各省份 HFMD 的发病率具有显著的空间自相关性。各年份的 Moran's I 值波动幅度不大,说明发病率的集聚态势较为稳定。整体上来看,自相关程度先上升后下降,并在 2017 年达到最强,其 Moran's I 值为 0.547。见表 2。

2.2.2 局部 Moran's I 分析 从 2011、2014、2017、2020 年各省份 HFMD 发病率的空间集聚特征可以看出, HFMD 发病率具有“高-高”集聚特征的省份主要集中在南部地区,特别是沿海省份(如广东、广西、福建等),这可能因为南部地区平均气温较高,降水量充足,气候条件适合病毒生存繁殖。发病率具有“低-低”集聚特征的省份分布在西部和东北地区,“低-高”集聚特征的省份集中在中部地区。见图 4。

表 2 2011—2020 年中国大陆 HFMD 发病率全局空间自相关分析结果

Table 2 Global spatial autocorrelation analysis results of HFMD incidence in the mainland of China, 2011 - 2020

年份	Moran's I	Z	P
2011 年	0.418	4.639	0.001
2012 年	0.494	4.635	0.001
2013 年	0.485	4.820	0.002
2014 年	0.475	4.518	0.001
2015 年	0.431	4.845	0.001
2016 年	0.502	4.630	0.001
2017 年	0.547	5.267	0.001
2018 年	0.534	4.807	0.001
2019 年	0.514	4.837	0.001
2020 年	0.493	4.408	0.001

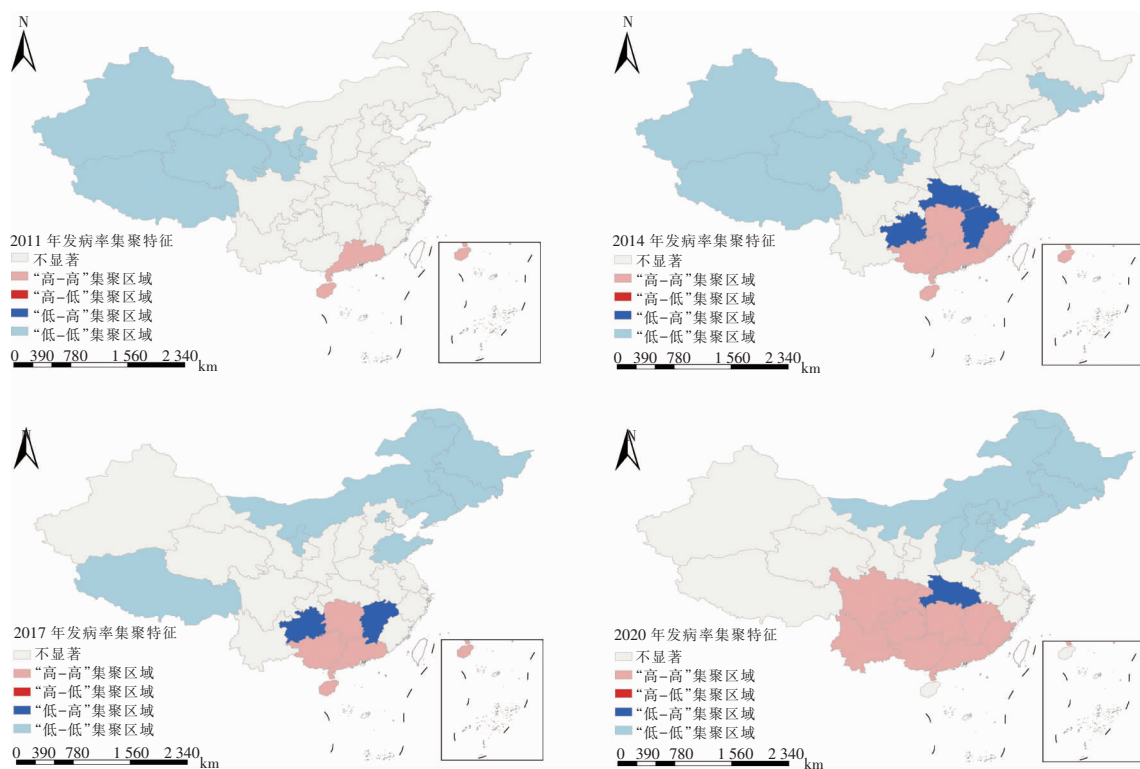


图 4 2011、2014、2017、2022 年中国大陆各省份 HFMD 发病率空间集聚特征

Figure 4 Spatial clustering characteristics of HFMD incidence in each province of the mainland of China in 2011, 2014, 2017 and 2022

### 2.3 气象因素对 HFMD 发病率影响的时空变化特征

2.3.1 共线性诊断和模型对比 由于解释变量间存在共线性时会对 GTWR 模型的参数估计、可解释性及模型预测的稳定性产生影响,甚至可能会导致 GTWR 模型在某些区域过度拟合数据,而在其他区域拟合效果不佳。因此,本研究采用方差膨胀因子(variance inflation factor, VIF)检验 4 个气象因素之间是否存在共线性问题。通常情况下,VIF < 10 时认为变量间不存在共线性。由表 3 可知,每个气象因素的 VIF 值均 < 5,说明气象因素之间不存在共线性问题。

表 3 气象因素共线性诊断结果

Table 3 Collinearity diagnosis results for meteorological factors

气象因素	VIF
平均风速	3.327
平均气温	1.015
累计日照	1.089
累计降水	3.282

为比较 GTWR 模型、OLS 模型和 GWR 模型的拟合效果,计算 3 个模型的  $R^2$ 、AICc 和残差平方和(RSS)3 个评价指标,可以看出 GTWR 模型拟合效果最优。见表 4。

表 4 模型拟合结果对比

Table 4 Comparison of model fitting results

评价指标	OLS	GWR	GTWR
$R^2$	0.133	0.358	0.508
AICc	10 037.649	9 204.150	3 719.000
RSS	3 224.938	2 386.207	1 831.000

2.3.2 空间变化特征分析 为探究气象因素对 HFMD 发病率在空间尺度上的影响特征,将 2011—2020 年的系数估计值在区域上进行平均化处理。平均风速对内蒙古、北京及东北地区的 HFMD 发病率具有较弱的正向促进作用,对西北、西南、南部及中部地区省份的发病率具有抑制作用,并且抑制程度呈现出由西南地区向外发散减弱的空间变化趋势。平均温度对所有地区的 HFMD 发病率均具有正向促进作用,影响程度整体上呈现出由南向北逐渐减弱的空间变化趋势。累计日照对各地区的 HFMD 发病率均具有抑制作用,并呈现出由东南向西北逐渐减弱的空间变化趋势。除黑龙江和吉林外,累计降水对各省份 HFMD 发病率的影响均表现为促进作用,影响程度呈现出由南向北逐渐减弱的变化趋势。见图 5。

2.3.3 季节变化特征分析 图 6 分别展示了所有省份气象因素在不同月份的平均系数估计值的箱线图。大部分省份平均风速的系数值均 < 0,且整体呈现出逐渐减小的变化趋势,12 月份系数值最小,说明随着月份的增大,平均风速对各省份 HFMD 发病率的抑制作用不断增强。每个月份平均气温的系数值均 > 0,并且大部分省份的系数值 > 0.2,整体呈现出“双峰”变化趋势,其中主峰在 3 月份出现,次峰在 11 月份出现,说明平均气温对 HFMD 的发病率在每个月份都具有促进作用,其强度在 3 月份和 11 月份达到两个峰值。累计日照对各省份的 HFMD 发病率在每个月份均具有抑制作用。系数值在每个月份上均 < 0,整体上呈现出“U”型的变化趋势,6—9 月份累计日照对发病率的抑制作用最强。各省份累计降水的系数值在每个月份均 > 0,整体上呈现出“W”型的变化趋势,1—4 月份表现出下降趋势,6—12 月份表现出上升趋势,5 月份出现一个峰值,累计降水在冬季和春夏之交时对 HFMD 发病率具有较强的促进作用。

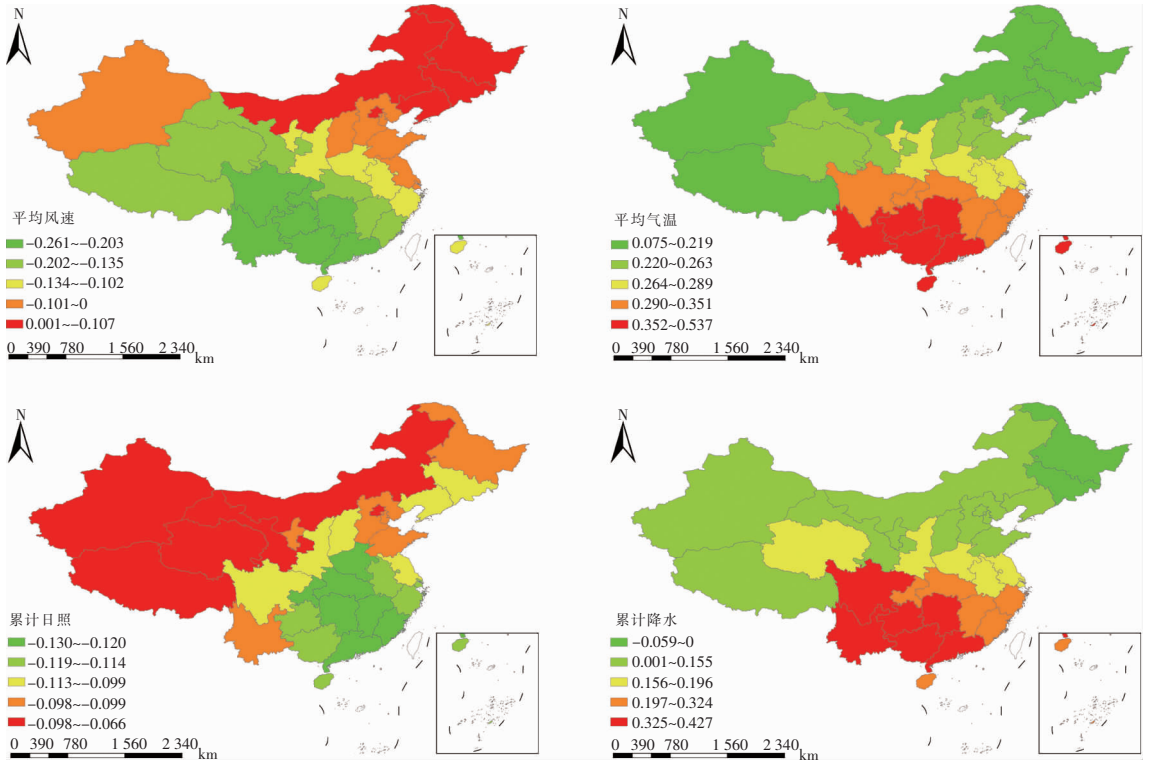


图 5 2011—2020 年中国大陆各省份气象因素回归系数估计平均值空间变化特征

Figure 5 Spatial variation characteristics of estimated average regression coefficients for meteorological factors of each province of the mainland of China, 2011 – 2020

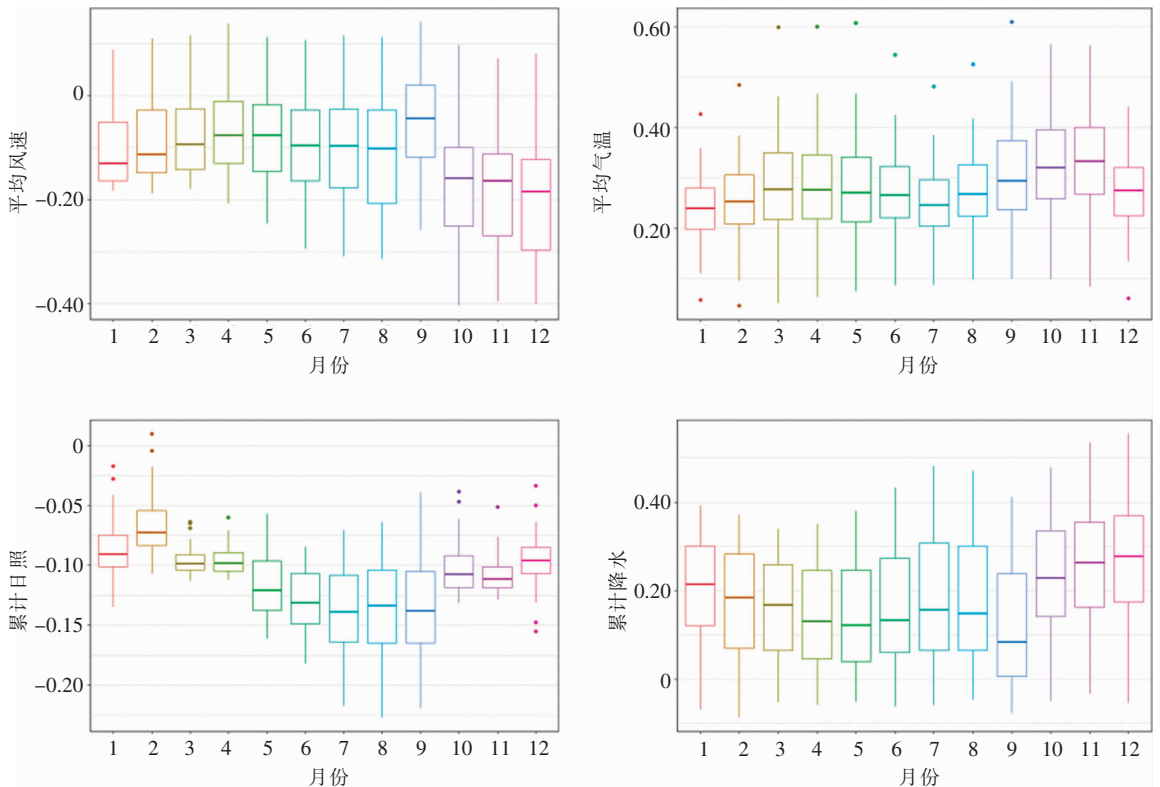


图 6 2011—2020 年中国大陆各省份气象因素系数估计平均值月份变化特征

Figure 6 Monthly variation characteristics of estimated average coefficients for meteorological factors of each province of the mainland of China, 2011 – 2020



### 3 讨论

2011—2020 年中国 HFMD 年发病率具有两年为一周期,偶数年发病率高于奇数年发病率的周期性,与先前研究<sup>[10]</sup>结果一致。各省份 HFMD 发病率具有明显的季节特征,呈现出春末夏初和秋末冬初的“双峰”分布特征,一方面可能是受中国季风气候的影响,春夏季交替时期的湿热天气促进了病毒的繁殖和传播;另一方面可能是因为 9—10 月份正值开学季,学校出现人群集聚导致发病风险增加,并且秋冬季节交替,气温变化较大,容易导致儿童免疫力下降,从而增加了患 HFMD 的概率<sup>[19]</sup>。HFMD 高发地区主要集中在中国南部地区,这可能归因于南部地区省份的主要气候类型为亚热带和热带季风气候,常年平均气温较高,降水量充足,气候条件适合病毒的传播和繁殖<sup>[20]</sup>。西部地区的干冷气候及东北地区的低温气候条件不利于病毒的繁殖和传播,因而发病率相对较低。高发省份逐渐向中部地区转移可能是因为在国家宏观经济政策的推动下,中部地区在城镇化、基础设施建设和交通网络改善等方面得到了大量政策扶持,从而提高了中部地区的移民数量,较高的人口密度增加了 HFMD 的发病风险<sup>[21]</sup>。

在空间尺度上,平均风速对内蒙古和东北地区 HFMD 发病率具有较弱的促进作用,这可能是由于夏季风多来自南方,通常携带较多水汽,从而形成温度较高、湿度较大的环境条件,促进了病毒的繁殖和传播。对于西部地区的干热和南部地区湿热气候环境,平均风速的增加能够有效降低温度及促进空气中水分蒸发,形成低温干燥的环境条件,从而抑制病毒的活性,降低传播风险<sup>[22]</sup>。平均气温和累计降水对各地区的 HFMD 发病率均具有促进作用,这可能归因于气温的升高和降水的增加更容易形成适合病毒生存的高热高湿环境<sup>[23]</sup>。而累计降水对黑龙江和吉林的发病率具有较弱的抑制作用,这可能因为黑龙江和吉林的冬季降水多以降雪的形式出现,抑制了户外活动从而降低了 HFMD 的传播风险。累计日照对各省份 HFMD 发病率均具有抑制作用。日照时长的增加能够促进水分的增发从而降低空气湿度,降低病毒传播的风险,并且太阳光中的紫外线能够直接破坏病毒的蛋白衣壳和核酸从而使其灭活<sup>[10]</sup>。在时间尺度上,平均风速对 HFMD 发病率的抑制作用整体上会随着月份增大逐渐增强。平

均气温对 HFMD 发病率的促进作用在不同月份间波动幅度不大,在 3—4 月份和 10—11 月份呈现出两个小高峰,这可能是由于春季和冬季温度的升高增加了人群外出和接触的概率,导致病毒的传播风险上升。累计日照对 HFMD 发病率的抑制作用在夏季有明显增强。累计降水在 1—9 月份对 HFMD 发病率影响整体上显示出逐渐减弱的变化趋势,这可能因为随着雨季的到来过多的降水会破坏病毒的生存环境并减少人群的户外活动,从而降低感染风险。

本研究采用集中度分析、空间自相关分析以及 GTWR 模型分析了中国大陆 HFMD 发病率的时空异质特征,包括季节性、区域集聚性并量化评估了气象因素对 HFMD 发病率影响的时空异质特征,能够为中国大陆各省份应对季节变化制定精确的 HFMD 预防和控制措施提供有力的理论支撑。但本研究也存在着不足和局限性:(1)由于市域和县域逐月 HFMD 发病率数据的获取较为困难,因此本研究仅探究了气象因素对整个省份 HFMD 发病率在月份上的影响特征,以市域或县域为单位探究气象因素对中国大陆 HFMD 发病率影响时空变化特征有待进一步研究;(2)研究中仅考虑了平均风速、平均气温、累计日照和累计降水 4 个气象因素,而社会经济因素、人口因素以及疫苗的使用和人为的防控措施等对 HFMD 发病率影响的时空变化特征同样有待进一步研究;(3)GTWR 模型仅能捕捉到气象因素对 HFMD 发病率影响的连续变化特征,而现实中气象因素对 HFMD 发病率的影响特征在不同区域和季节之间可能会出现跳跃性的突变,发展一种时空聚类模型或许能够很好的解决这一问题。

利益冲突:所有作者均声明不存在利益冲突。

### [参考文献]

- [1] Zhu PY, Ji WQ, Li D, et al. Current status of hand-foot-and-mouth disease[J]. J Biomed Sci, 2023, 30(1): 15.
- [2] 中华人民共和国卫生部. 手足口病预防控制指南(2008 年版)[J]. 社区医学杂志, 2008, 6(10): 69-71. Ministry of Health of the People's Republic of China. Guidelines for the prevention and control of hand, foot, and mouth disease (2008 edition)[J]. Journal of Community Medicine, 2008, 6(10): 69-71.
- [3] Xu CD, Xiao GX. Spatiotemporal risk mapping of hand, foot and mouth disease and its association with meteorological variables in children under 5 years[J]. Epidemiol Infect, 2017, 145(14): 2912-2920.
- [4] 梁小洁, 张智芳, 王晓欢. 中国内地手足口病流行特征及空间聚

- 集性分析[J]. 中国人兽共患病学报, 2023, 39(10): 1009-1016.
- Liang XJ, Zhang ZF, Wang XH. Spatio-temporal distribution of hand, foot and mouth disease in China's Mainland[J]. Chinese Journal of Zoonoses, 2023, 39(10): 1009-1016.
- [5] Chen YJ, Sun WW, Ling F, et al. Seasonality and meteorological factors associated with different hand, foot, and mouth disease: serotype-specific analysis from 2010 to 2018 in Zhejiang Province, China [J]. Front Microbiol, 2022, 13: 901508.
- [6] Nguyen HX, Chu C, Tran QD, et al. Temporal relationships between climate variables and hand-foot-mouth disease: a multi-province study in the Mekong Delta Region, Vietnam [J]. Int J Biometeorol, 2020, 64(3): 389-396.
- [7] Bo ZY, Ma Y, Chang ZR, et al. The spatial heterogeneity of the associations between relative humidity and pediatric hand, foot and mouth disease: Evidence from a nation-wide multicity study from mainland China[J]. Sci Total Environ, 2020, 707: 136103.
- [8] 陈小佳, 黄邓高, 冯桃. 2008—2018 年我国手足口病流行性分析[J]. 海南医学院学报, 2021, 27(15): 1142-1148, 1155.
- Chen XJ, Huang DG, Feng T. Prevalence analysis of hand, foot and mouth disease in China, 2008-2018[J]. Journal of Hainan Medical University, 2021, 27(15): 1142-1148, 1155.
- [9] WHO. COP26 special report on climate change and health: the health argument for climate action[EB/OL]. (2021-10-11) [2024-10-27]. <https://www.who.int/publications/i-item/9789240036727>.
- [10] 宋飏, 刘艳晓, 张瑜, 等. 中国手足口病时空分异特征及影响因素[J]. 地理学报, 2022, 77(3): 574-588.
- Song Y, Liu YX, Zhang Y, et al. Spatio-temporal differentiation characteristics and influencing factors of hand, foot, and mouth disease in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(3): 574-588.
- [11] Zhang C, Kou Z, Wang X, et al. Exploring the spatiotemporal effects of meteorological factors on hand, foot and mouth disease: a multiscale geographically and temporally weighted regression study[J]. BMC Public Health, 2024, 24(1): 3129.
- [12] Wang L, Xu CD, Wang JF, et al. Spatiotemporal associations between hand, foot and mouth disease and meteorological factors over multiple climate zones[J]. Int J Biometeorol, 2023, 67(9): 1493-1504.
- [13] 韩春英, 苟发香, 张晓曙, 等. 2010—2018 年甘肃省手足口病季节性流行第二峰气象驱动因素分析[J]. 中国公共卫生, 2024, 40(2): 218-222.
- Han CY, Gou FX, Zhang XS, et al. Meteorological drivers of second seasonal peak of hand, foot and mouth disease incidence among children and adolescents in Gansu province, 2010-2018: a register-based data analysis[J]. Chinese Journal of Public Health, 2024, 40(2): 218-222.
- [14] Hu MG, Li ZJ, Wang JF, et al. Determinants of the incidence of hand, foot and mouth disease in China using geographically weighted regression models [J]. PLoS One, 2012, 7(6): e38978.
- [15] Dong WH, Li XE, Yang P, et al. The effects of weather factors on hand, foot and mouth disease in Beijing[J]. Sci Rep, 2016, 6(1): 19247.
- [16] 栾桂杰, 张伟燕, 张英洁, 等. 2008—2017 年山东省夏季高温对手足口病的影响研究[J]. 环境与健康杂志, 2024, 41(2): 115-119.
- Luan GJ, Zhang WY, Zhang YJ, et al. Effect of high temperature on hand, foot and mouth disease during the summer in Shandong, 2008-2017 [J]. Journal of Environment and Health, 2024, 41(2): 115-119.
- [17] Qi HC, Li Y, Zhang J, et al. Quantifying the risk of hand, foot, and mouth disease (HFMD) attributable to meteorological factors in East China: a time series modelling study[J]. Sci Total Environ, 2020, 728: 138548.
- [18] 吴成勇, 马世河, 陈冲. 2018—2021 年重庆市开州区儿童手足口病发病特征与气象因素分析[J]. 公共卫生与预防医学, 2023, 34(4): 89-92.
- Wu CY, Ma SH, Chen C. Prevalence trend of hand-foot-mouth disease in children and its correlation with meteorological factors in Kaizhou District, Chongqing in 2018-2021[J]. Journal of Public Health and Preventive Medicine, 2023, 34(4): 89-92.
- [19] 卞丽娜. 2012—2016 年无锡市惠山区手足口病流行病学特征分析[D]. 苏州: 苏州大学, 2019.
- Bian LN. The epidemiological characteristics of hand-foot-mouth disease in Huishan District of Wuxi City during 2012 to 2016[D]. Suzhou: Soochow University, 2019.
- [20] Rui J, Luo KW, Chen QP, et al. Early warning of hand, foot, and mouth disease transmission: a modeling study in mainland, China [J]. PLoS Negl Trop Dis, 2021, 15(3): e0009233.
- [21] Wu R, Li ZG, Wang SJ. The varying driving forces of urban land expansion in China: Insights from a spatial-temporal analysis[J]. Sci Total Environ, 2021, 766: 142591.
- [22] Liu YX, Feng ZQ, Song Y. The impacts of meteorological factors on the incidence of hand, foot, and mouth disease in China: an interactive perspective[J]. Appl Geogr, 2023, 160: 103092.
- [23] Lau SYF, Chen EF, Mohammad KN, et al. Ambient temperature and relative humidity as possible drivers of the hand, foot, and mouth disease epidemics in Zhejiang Province, China [J]. Atmos Environ, 2021, 244: 117984.

(本文编辑: 翟若南)

**本文引用格式:** 陈庚, 张辉国, 黄蕊芳. 气象因素对中国大陆手足口病影响的时空异质特征探究[J]. 中国感染控制杂志, 2025, 24(2): 158-167. DOI:10.12138/j.issn.1671-9638.20256778.

**Cite this article as:** CHEN Geng, ZHANG Huiguo, HUANG Ruifang. Spatiotemporal heterogeneity of meteorological factors on the incidence of hand-foot-and-mouth disease in the mainland of China[J]. Chin J Infect Control, 2025, 24(2): 158-167. DOI: 10.12138/j.issn.1671-9638.20256778.