

# 基于多源数据福厦城市高温热浪风险 统计评估与影响因素研究

苏妍<sup>1</sup>, 常康薇<sup>1</sup>, 陈奕玲<sup>1</sup>, 旷开金<sup>1</sup>, 李衡荣<sup>2</sup>

(1. 福建江夏学院金融学院, 福州 350108; 2. 福建江夏学院海峡财经学院, 福州 350108)

**摘要:** 以福建省福州市、厦门市为研究区域, 基于2013—2022年两市相关数据, 以高温热浪天气现象为切入点, 从高温热浪的风险暴露性、风险敏感性、风险适应性3个维度进行脆弱性统计评估, 基于地理加权回归和地理探测器模型分析高温热浪的影响因素。研究表明: 福厦两市的地理环境条件、经济社会发展水平差异导致两市高温热浪程度不同, 厦门市高温热浪脆弱性更明显; 常住人口的数量、经济发展水平、建成区绿地覆盖率对高温热浪影响最大, 其中GDP、建成区绿地覆盖率为负向影响, 常住人口数为正向影响, 同时资金、技术设施也在一定程度上影响福厦两市高温热浪的发生。为此, 在全球气候变暖、气象灾害频发的背景下, 要优化水路分布, 增加城市绿化、提升植被覆盖率, 完善基础设施建设, 在保证经济发展的同时, 实现经济效益和生态效益相统一。

**关键词:** 高温热浪; 脆弱性测度; 地理加权回归; 地理探测器

**中图分类号:** X196; X22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)04-0297-11

高温热浪风险已成为国际社会普遍关注的气候变化风险问题之一。近年来, 高温热浪已经成为全球气候变暖下一个越来越普遍的气象灾害<sup>[1]</sup>。根据世界气象组织的数据, 全球各地区的高温热浪事件频率和强度正在增加, 对人类健康、生态环境和社会生产生活带来越来越大的威胁<sup>[2]</sup>。

我国一般把连续3 d以上最高温超过35℃的高温天气过程称为高温热浪<sup>[3]</sup>。关于高温热浪产生原因学者将其归为大气环流<sup>[4]</sup>和城市建设两大类。例如, 鹿文涵等<sup>[5]</sup>从厄尔尼诺现象和热岛效应出发, 发现厄尔尼诺现象和热岛效应一定程度上加剧高温热浪事件发生。王峤等<sup>[6]</sup>、杨林川等<sup>[7]</sup>指出不合理的城建模式、高密度人口和建筑物、地表植被覆盖面积小和下垫面等变化会加剧城市的热岛效应, 从而使其面对高温热浪时呈露出较高脆弱性。也有学者从经济、环境和人体健康等方面阐述高温热浪天气现象造成的影响。例如, 李扬等<sup>[8]</sup>指出在供给侧方面高温热浪对人体健康的影响存在区域和适应力差异, 高温天气会造成劳动生产率显著下降, 劳动密集型企业生产成本提高。在需求侧方面

通过影响居民消费选择及结构变化, 使政府开支增加, 对农业造成了影响。刘金平等<sup>[9]</sup>指出南北方高温热浪持续时间存在差异, 高温热浪发生时气候温暖地区对碳排放响应更为强烈, 气候寒冷地区累积效应明显。郝增超等<sup>[10]</sup>通过计算干旱指数指出高温热浪会加剧农业、水文干旱, 不利于农业生产。Samuel等<sup>[11]</sup>通过研究泛欧洲范围内复合干旱灾害事件指出高温热浪会增加引发火灾的可能性。Romanello等<sup>[12]</sup>指出高温天气会危害人体健康和心理健康。王斌等<sup>[13]</sup>和付桂琴等<sup>[14]</sup>提到高温热浪通过影响人体舒适度从而导致患病风险提高。

通过梳理相关文献, 目前国内外学者关于高温热浪的产生原因和造成结果已有深入探讨, 取得一批有价值研究成果。虽然近年对高温热浪脆弱性的研究有所增加, 目前研究较为集中在高温热浪较为严重地区, 对福建省高温热浪影响的影响因素分析较少。福建省作为我国植被覆盖度最高的地区, 高温热浪程度仍较为严重, 其中福州市作为“四大火炉”之一<sup>[15]</sup>, 高温热浪对生产生活造成了不同程度的影响。为此, 本文以福建省福州市、厦门市为

**收稿日期:** 2024-06-02

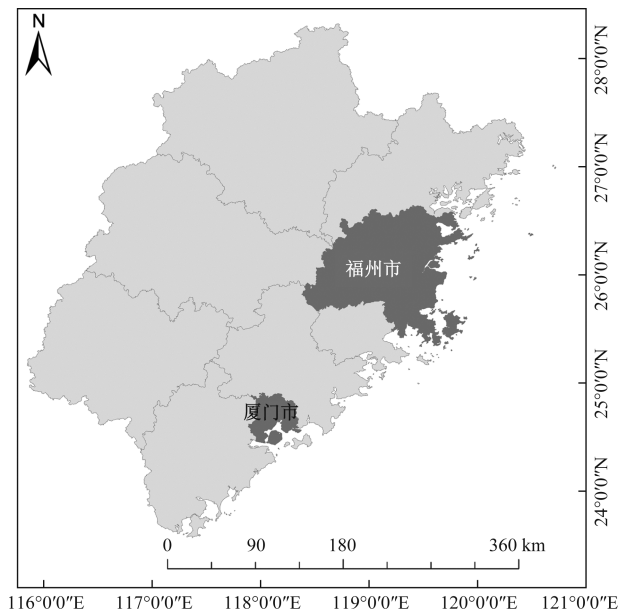
**基金项目:** 福建省自然科学基金(2023J011116); 福建省社会科学青年基金(FJ2022C057)

**作者简介:** 苏妍(2004—), 女, 福建泉州人, 研究方向为资源环境统计; 常康薇(2004—), 女, 河南灵宝人, 研究方向为资源环境统计; 陈奕玲(2003—), 女, 福建漳州人, 研究方向为资源环境统计; 通信作者旷开金(1988—), 男, 江西吉安人, 博士研究生, 副教授, 研究方向为资源环境统计; 李衡荣(1989—), 男, 福建三明人, 硕士, 讲师, 研究方向为思想政治教育。

研究区域,对两市高温热浪脆弱性进行评估,研究结果对地区高温热浪趋势预警有重要意义。

## 1 研究区概况

福建省地处中国东南沿海,呈依山傍海态势,属典型的亚热带季风气候,四季分明,温暖湿润,夏季气温较高。根据 2013 年国家气候中心统计分析的全国夏季炎热城市情况,福州市炎热程度排名全国第一,是 2013 年的“新四大火炉”之首<sup>[15]</sup>。根据 2019 年中国气象局国家气候中心发布榜单,福州被冠名为“新四大火炉”。福州市发生高温热浪的可能性极大,近 10 年来,福州市日最高气温呈现明显的波动上升趋势,最高温达 42 °C,其中 2022 年 8 月福州市共有 30 d 最高气温超过 35 °C。厦门市作为福建省经济强市,二者在地理位置和气候条件方面具有较高相似性。近 10 年来,厦门市最高温达 38 °C,其中 2020 年 7 月共有 23 d 最高气温超过 35 °C,根据不同风险等级,厦门市由高温热浪次高风险区逐步转为高风险区<sup>[1]</sup>。因此,本文以福建省福州市、厦门市作为研究对象(图 1),分析两市造成高温热浪的原因和影响因素差异。



基于审图号为 GS(2019)1822 号标准地图制作,底图无修改

图 1 研究区域

## 2 数据来源与指标选取

### 2.1 数据来源

数据来源于气象数据、福州市和厦门市统计年鉴数据、土地相关数据。其中,高温及高温热浪相关数据来源于中国气象网、福州市和厦门市 2013—2022 年 6—8 月的每日气象数据,指标体系相关统

计数数据来源于 2013—2022 年《福州市统计年鉴》《厦门市统计年鉴》《中国县域统计年鉴(县市卷)》统计公报等。土地相关数据来自地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn>)。对于部分缺失的数值采用插值法、回归方程进行填补。

### 2.2 指标选取

参考美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)脆弱性评估教程、美国国家环保局(U. S Environmental Protection Agency, EPA)生态风险评估导则以及 IPCC 的风险评估方法,遵循准确性和区域代表性原则,基于 VSD(vulnerability scoping diagram)假设模型<sup>[16]</sup>,结合金星等<sup>[1]</sup>对高温热浪风险指标的划分,将高温热浪风险评估分为风险暴露性、敏感性、适应性 3 个维度。暴露性主要考虑福州市、厦门市 2013—2022 年 6—8 月的每日气温。敏感性针对经济社会发展过程中人口、社会发展以及环境因素,选取死亡率、GDP、人均公园绿地面积等作为研究指标。风险性则从资金和技术方面入手,选取每千人拥有医生数、病床数和一般公共财政预算总收入等指标。具体指标体系如表 1 和表 2 所示。

## 3 福厦城市高温热浪风险经济地理因素分析

### 3.1 地理位置因素分析

根据地理空间数据云相关数据(<https://www.gscloud.cn>),基于地理知识,结合相关数据绘制高程图(图 2)。由图 2 可知,福州市位于中国东南沿海,属于典型的亚热带季风气候区。福州市受到副热带高压的影响,在稳定少动而暖性深厚的天气系统下,太阳辐射可更多达到地面,导致地面和近地面大气获得更多热量,引发高温热浪风险。福州市西北部地势较高,高程值较高,东南部地势较低,是典型的河口盆地,被群山峻岭环抱,热量聚集,不利于热量的扩散,加剧了高温热浪的强度。其次,福州市地处东南沿海,受海洋性气候的影响,热量通过海风输送到陆地,加剧了高温天气。

厦门市位于中国东南沿海,亦属于亚热带季风气候区,受到副热带高压的影响,太阳辐射达到地面,热量积累,引发高温热浪。厦门的地理位置和地形特点也对高温热浪的形成起到了一定的影响。从高程图(图 3)可以看出,相较于福州市区域位置,厦门地区的地形较为平坦,没有高山的阻挡,气流不受高山阻碍,能够流畅流动,热量更容易向海洋扩散,不容易堆积。

表 1 福州市指标体系

目标层	准则层	测度	指标层	
风险暴露性(0.28)	高温热浪暴露度(0.849)	频度	连续 3d $\geq 35^\circ\text{C}$ 频次(0.05)	
		强度	高温日数(0.048) 高温热浪总天数(0.05) 日最高气温(0.089)	
	人口暴露度(0.151)	人口数量	常住人口数(0.042)	
	风险敏感性(0.398)	人口属性(0.361)	人口经济社会特征	性别比(0.052) 死亡率(0.092)
经济发展水平(0.368)		经济发展	GDP(0.0418) 第一产业(0.033) 第二产业(0.034) 第三产业(0.038)	
			环境状况(0.271)	绿地覆盖率 建成区绿地覆盖率(0.054) 绿地面积 人均公园绿地面积(0.054)
			风险适应性(0.322)	资金可达性(0.228)
居民存款余额	城乡居民储蓄存款余额(0.032)			
设施技术可达性(0.772)	防病条件	每千人病床数(0.059)		
	信息传播条件	电视综合人口覆盖率(0.057) 固定电话用户(0.071)		
专业技术人员	每千人拥有医生数(0.061)			

表 2 厦门市指标体系

目标层	准则层	测度	指标层	
风险暴露性(0.430)	高温热浪暴露度(0.932)	频度	连续 3 d $\geq 35^\circ\text{C}$ 频次(0.079)	
		强度	高温日数(0.072) 高温热浪总天数(0.079) 日最高气温(0.171)	
	人口暴露度(0.068)	人口数量	常住人口数(0.029)	
	风险敏感性(0.338)	人口属性(0.261)	人口经济社会特征	性别比(0.071) 死亡率(0.017)
经济发展水平(0.382)		经济发展	GDP(0.031) 第一产业(0.047) 第二产业(0.021) 第三产业(0.030)	
			环境状况(0.357)	绿地覆盖率 建成区绿地覆盖率(0.071) 绿地面积 人均公园绿地面积(0.049)
			风险适应性(0.314)	资金可达性(0.311)
居民存款余额	城乡居民储蓄存款余额(0.031)			
设施技术可达性(0.689)	防病条件	每千人病床数(0.052)		
	信息传播条件	电视综合人口覆盖率(0.015) 固定电话用户(0.052)		
专业技术人员	每千人拥有医生数(0.040)			

### 3.2 水系分布情况分析

根据国家测绘地理信息局和相关地理信息系统数据库,基于 2020 年全国电子地图省市行政区划道路的矢量数据,绘制福州、厦门的水系分布如图 4 所示。

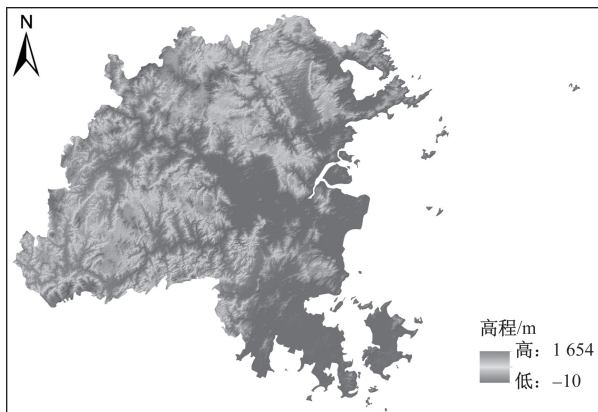
由图 4 可知,福州市中心位置有闽江流过,而厦门市中心位置水系分布较少。在特定气候条件下,水体蒸发量增加,可以吸收热量,形成冷却效应,有利于缓解高温热浪的影响。水系分布较密集的地区云量较多,阻挡了部分太阳辐射,有利于缓解高温热浪。

厦门市和福州市都是临海城市,海洋温度波动相对较小,可以稳定地提供水汽和热量,有利于缓解高温热浪。由于城市化进程的加速,削弱水系对热量吸收作用,厦门市和福州市仍存在较明显的高温热浪天气现象。

### 3.3 经济、社会因素相关分析

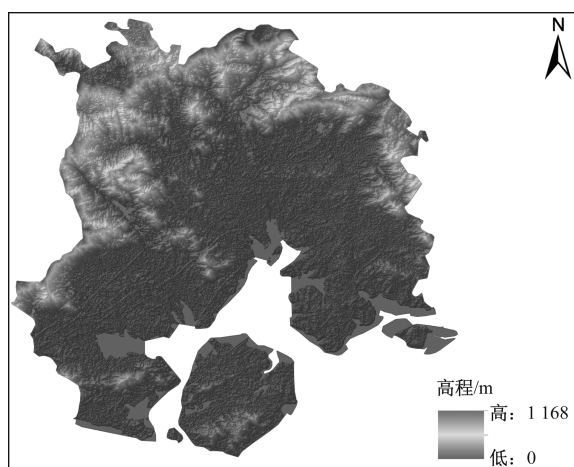
#### 3.3.1 福州市指标相关分析

如图 5 所示,福州的高温热浪与死亡率、性别比和建成区绿地覆盖率呈负相关性。由于基础设施建设完善,医疗技术水平提高,福州的死亡率总体



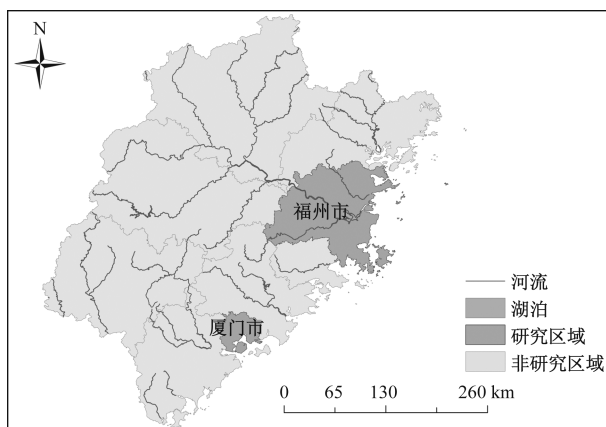
基于审图号为 GS(2019)1822 号标准地图制作,底图无修改

图 2 福州市高程



基于审图号为 GS(2019)1822 号标准地图制作,底图无修改

图 3 厦门市高程



基于审图号为 GS(2019)1822 号标准地图制作,底图无修改

图 4 福州市、厦门市水系分布

呈下降趋势,高温热浪与死亡率间呈现负相关。从整体上看,男性在面对高温热浪时其适应性较高,而女性在面对高温热浪时其适应性较弱。绿地覆盖率越高,太阳辐射所散发的热量被吸收越多,可缓解城市局部高温,因此减少高温热浪发生频次,

由此说明在治理方面可以通过增加绿地覆盖率来应对高温热浪的发生。

高温热浪与每千人医生、病床数和人均公园绿地面积呈现正相关。此外,高温热浪也与常住人口呈现正相关性,由于高人口密集度伴随城市建筑高密度,相应热岛效应发生次数有所提高,热岛效应的发生进一步引发高温热浪现象的发生风险。

### 3.3.2 厦门市指标相关分析

如图 6 所示,厦门市高温热浪与死亡率、性别比呈现高度正相关性。由图 6 可知,高温热浪的发生与死亡率上升存在一定关联。从性别比角度,厦门市近 10 年性别比总体上呈现女性人数多于男性,在面对高温热浪时的适应性能力较弱。此外,厦门高温热浪还与常住人口、病床数和医生数呈现正相关。厦门市高温热浪与人均公园绿地面积和固定电话用户呈现负相关性。厦门作为我国知名旅游城市,绿化工作较为到位,从植被与高温的关系上看,植被覆盖越多,可降低局部温度,减少高温天数。

### 3.3.3 福厦城市经济发展指标分析

从厦门、福州的 GDP、第一、二、三产业相关指标数值对比可以看出,两市呈现差异性但都呈现增长趋势(图 7)。从 GDP 来看,福州高于厦门,说明近 10 年来,福州经济发展水平高于厦门。从第二产业来看,福州高于厦门,说明福州的工业和建筑业产量更高,工业带来的污染和大气排放加剧了福州高温热浪的程度,建筑业影响了福州的城市下垫面,导致太阳辐射的反射程度减弱,蓄热能力增强,热量无法散发,加剧高温热浪形成。从第三产业来看,厦门高于福州,说明厦门的服务业更发达,厦门人口密度较大,热岛效应加剧,引发高温热浪风险,增加人群健康威胁。

## 4 福厦城市高温热浪风险统计评估

### 4.1 熵值法

熵值法是一种评估特定指标离散水平的数学方法,在实际应用中,根据各指标数值变化对整体的影响,计算各指标的熵值,确定相对应的权重<sup>[17]</sup>。本文采用熵值法对表 1 和表 2 的相关指标进行计算,确定权重,最后通过修正,得出较为客观的结果。具体计算过程如下:

$$\text{正向指标: } x_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

$$\text{负向指标: } x_{ij} = \frac{X_{\max} - X_{ij}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (2)$$

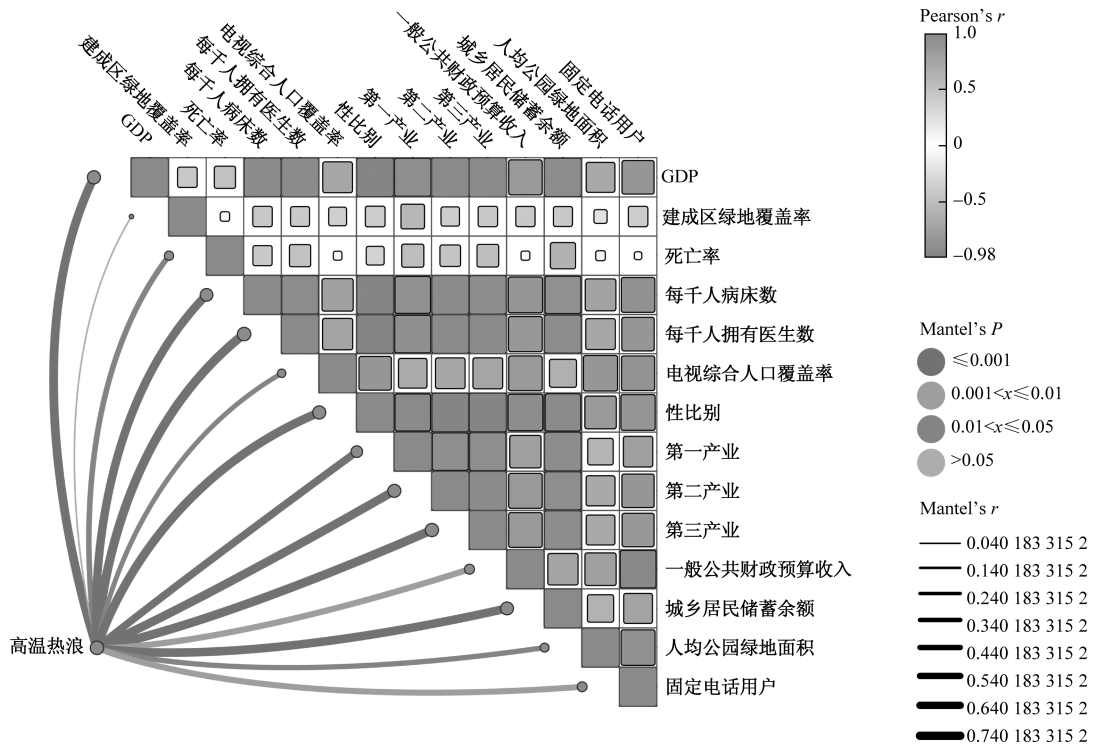


图5 福州市指标相关分析热力

$$E_i = -\frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \ln x_{ij} \quad (3)$$

$$W_i = \frac{1 - E_i}{\sum_{i=1}^n E_i} \quad (4)$$

$$\text{双向指标: } x_{ij} = \begin{cases} 1, & x_{ij} = \bar{x}_{ij} \\ 1 - \frac{|x_{ij} - \bar{x}_{ij}|}{\max |x_{ij} - \bar{x}_{ij}|}, & x_{ij} \neq \bar{x}_{ij} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$ ;  $X_{\max}$  为第  $i$  项指标的最大值;  $X_{\min}$  为第  $i$  项指标的最小值;  $E_i$  为第  $i$  个指标信息熵;  $W_i$  为第  $i$  个指标的熵权;  $x_{ij}$  为指标标准化值;  $n$  为评价指标个数。

#### 4.2 高温热浪风险水平测度与脆弱性评估

综合考虑高温热浪过程形成的经济、社会和自然环境等基本因素,采用了层次分析法(H-AHP)<sup>[18-19]</sup>来明确目标层、维度层及准则层的划分。根据构建的指标体系,反映福州、厦门受高温热浪的风险暴露性、敏感性和自身适应性影响,采用极差标准化方法对原始数据进行归一化处理。参考商佳璐等<sup>[20]</sup>使用加权综合评价法,分别计算福州和厦门的暴露性、敏感性和适应性因子。

$$E_i = \sum_{j=1}^5 Y_{ij} W_j \quad (6)$$

$$S_i = \sum_{j=1}^8 Y_{ij} W_j \quad (7)$$

$$A_i = \sum_{j=1}^6 Y_{ij} W_j \quad (8)$$

式中:  $E_i$  为  $i$  的暴露性因子;  $S_i$  为  $i$  的敏感性因子;  $A_i$  为  $i$  的适应性因子;  $W_j$  为第  $j$  指标的权重。

参考何苗等<sup>[21]</sup>的做法,通过乘除法反映相关指标间的关系,将三个因子进行综合运算得出高温脆弱性因子。

$$V_i = \frac{E_i S_i}{A_i} \quad (9)$$

式中:  $V_i$  为  $i$  的脆弱性因子。由式(9)可得,  $E_i$ 、 $S_i$  与  $V_i$  成正比,  $A_i$  与  $V_i$  成反比,即脆弱性越高,暴露性和敏感性越高,适应性越弱。

根据以上方法计算得出 2013—2022 年福州、厦门的高温热浪脆弱性因子得分,绘制折线图(图 8)可知,福州高温脆弱性因子得分于 2013 年达到峰值,之后呈现波动趋势。2020 年再次达到较高程度,可以看出该年福州市高温热浪风险暴露性、敏感性增强,而对高温的适应性较弱,导致脆弱性增强,说明福州在通过增加绿化面积、提高绿化覆盖率来预防高温天气的同时要采取措施应对高温带来的影响。

如图 9 所示,厦门的高温脆弱性得分大致呈上

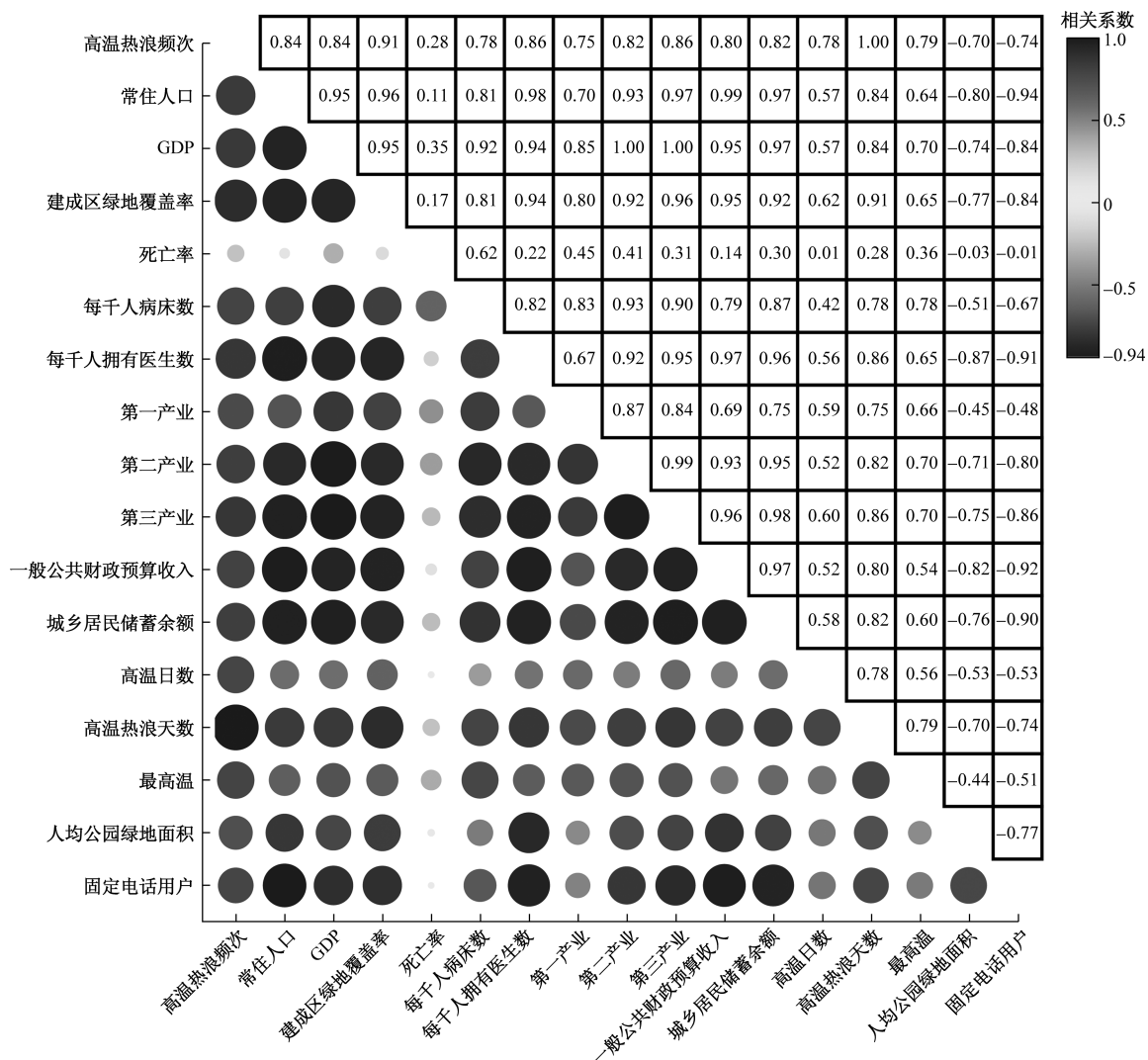


图 6 厦门市指标相关分析热力

升趋势,在 2020 年达到峰值。结合 2013—2022 年 6—8 月厦门市的每日最高温数据可以得出,厦门虽然气温较高,但达到高温热浪标准的相对较少。2020 年前厦门的脆弱性得分不断上升,说明厦门受高温热浪影响更严重,暴露性呈现上升趋势,风险暴露性和脆弱性同步增减,应对高温热浪天气现象的适应能力较弱。厦门高温脆弱性得分在 2021 年开始下降,2021 年厦门的风险暴露性相对较低,风险适应性有所提高,说明厦门的预防和治理措施及时到位,能够有效减少高温热浪带来的影响。

### 5 福厦城市高温热浪风险因素分析

#### 5.1 基于地理加权回归高温热浪风险因素分析

高温热浪天气形成过程受到多重因素的影响,为探究所选取的指标对于高温热浪形成的影响,采用地理加权回归(GWR)和多尺度地理加权回归(MGWR)模型探究相关指标对高温热浪的影响。

首先采用普通最小二乘法(OLS),以误差平方和最小为目标,逐个剔除相关性较低的变量,最终确定研究指标,计算公式为

$$f(x) = \alpha_1 \varphi_1(x) + \alpha_2 \varphi_2(x) + \dots + \alpha_m \varphi_m(x) \quad (10)$$

式中: $f(x)$ 为解释变量,即最高温度; $\varphi_k$ 为事先确定的一组无关变量; $\alpha_k$ 为待定系数。

地理加权回归(GWR)是一种空间分析技术,在普通线性回归模型的基础上进一步进行拓展<sup>[22]</sup>,考虑空间位置因素,计算公式为

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^n \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \varepsilon_i \quad (11)$$

式中: $y_i$ 为第  $i$  个样本点的被解释变量属性值,即最高温度; $x_{ik}$ 为第  $k$  个解释变量在  $i$  点处的值; $(u_i, v_i)$ 为  $i$  点处坐标; $\beta_k$ 为  $i$  点处第  $k$  个解释变量的回归系数; $\beta_0$ 为常数项, $\varepsilon_i$ 为随机误差项。

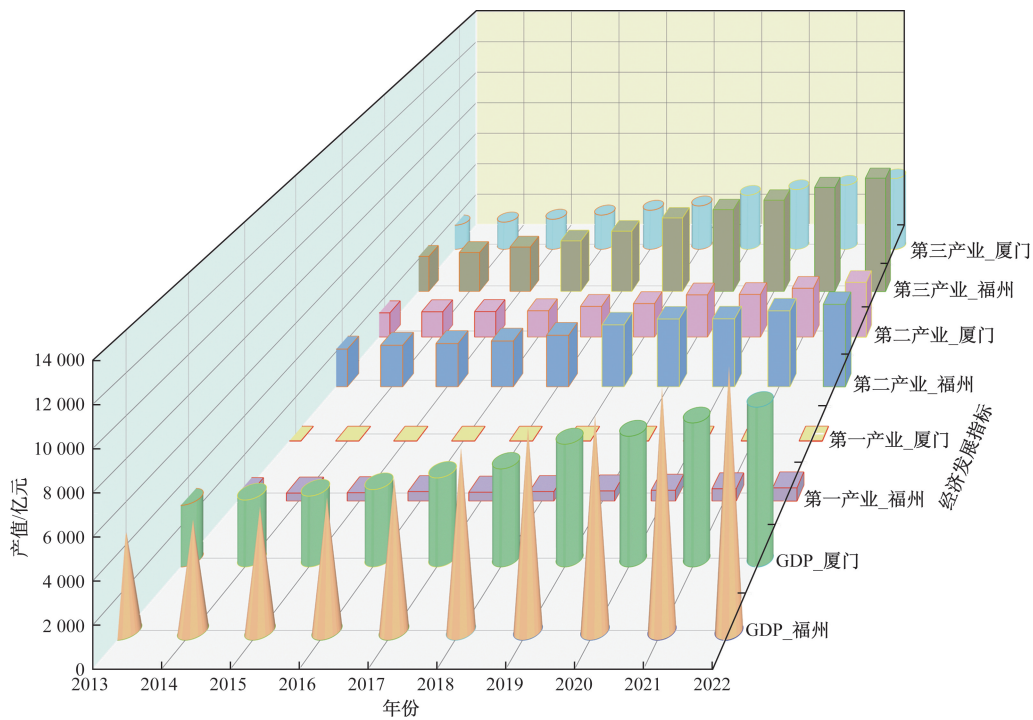


图 7 福厦城市经济发展指标瀑布

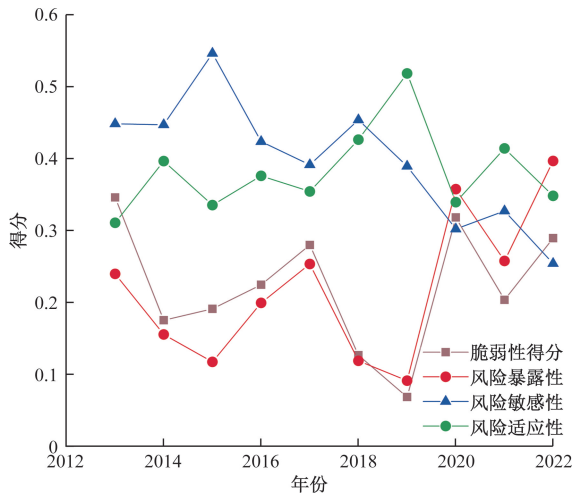


图 8 福州市高温热浪脆弱性因子得分

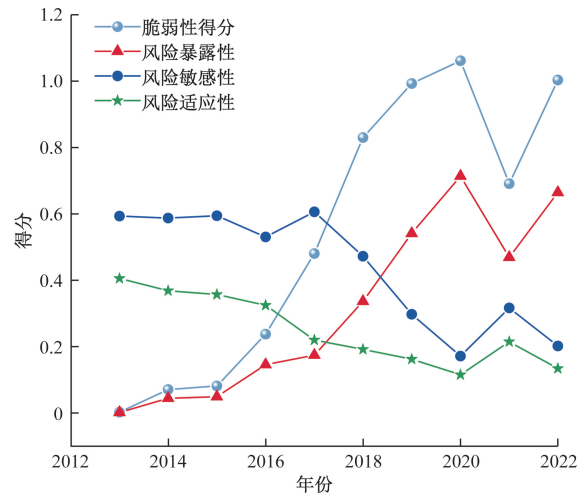


图 9 厦门市高温热浪脆弱性因子得分

多尺度地理加权回归(MGWR)是 GWR 模型的优化,使回归结果更加准确优化<sup>[23]</sup>,计算公式为

$$Y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{j=1}^n \beta_{kxj}(u_i, v_i)x_{ij} + \epsilon_i \quad (12)$$

式中: $Y_i$ 为被解释变量; $x_{ij}$ 为选取的因子; $k$ 为参与分析的空间单位总数; $\epsilon_i$ 为随机误差项; $(u_i, v_i)$ 为*i*点处坐标; $\beta_0$ 为截距常数项; $\beta_{kxj}(u_i, v_i)$ 为*i*处*j*个变量的局部回归系数<sup>[24]</sup>, $\beta_{kxj}$ 绝对值越大,作用越强<sup>[25]</sup>。采用 MGWR 和 GWR 建立模型得出相关结果,对比结果如表 3 所示。

表 3 MGWR 模型和 GWR 模型对比

变量	MGWR	GWR
$R^2$	0.939	0.889
AIC	17.896	26.394

注: $R^2$ 指拟合优度,表现了回归线对观测值的拟合程度;AIC指赤池信息量准则,衡量了模型的复杂度和拟合数据的优良性。

由表 3 可知, MGWR 的  $R^2$  高于 GWR 的,说明该模型拟合程度更好,而 MGWR 的 AIC 低于 GWR 的,说明该模型拟合程度较好且相较于 GWR 模型来说更简洁直观,因此选择 MGWR 模型,得到

高温热浪影响因素模型如下:

$$D = 1.050x_1 - 6.126x_2 + 6.375x_3 - 0.757x_4 \quad (13)$$

式中:  $D$  为高温天数;  $x_1$  为常住人口;  $x_2$  为 GDP;  $x_3$  为第三产业;  $x_4$  为一般公共财政预算总收入。

从系数上看, GDP 和一般公共财政预算总收入回归系数为负, GDP 对高温热浪的影响程度较大, 为降低高温热浪天气的产生, 经济发展水平较高的城市可以在绿化投资和优化能源结构方面投入更多的资金来降低高温的发生频率。相反, 常住人口和第三产业的回归系数为正, 其中常住人口的增加意味着更高的人口密度, 这可能导致城市热岛效应的加剧, 从而增加高温热浪的发生概率。第三产业主要为服务业, 通常伴随着较高的能源消耗, 不仅加剧了环境温度的上升, 而且进一步通过间接改变城市下垫面特性和大气对流换热过程, 进而影响城市温度, 促使高温热浪现象的发生。因此在发展第三产业的过程中, 应寻求一种可持续发展路径, 加大发展可再生能源, 增加城市绿化, 减少对环境的压力。

## 5.2 基于地理探测器高温热浪风险因素分析

高温热浪受多重因素的影响, 基于地理探测器空间统计模型, 探究影响因素之间的相互关系。地理探测器参考王劲峰和徐成东<sup>[26]</sup>的研究成果, 将数据叠加后对比分析其间的差异性是否显著, 显著的因素对高温热浪形成起主要作用。从不同因子的解释力进行判断, 对影响高温热浪的因素进行排序。通过方差比较, 探究变量之间的协同作用等关系<sup>[27]</sup>。具体计算如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (14)$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (15)$$

$$SST = N \sigma^2 \quad (16)$$

$$F = \frac{N_{X_1} (N_{X_2} - 1) SSW_{X_1}}{N_{X_2} (N_{X_1} - 1) SSW_{X_2}} \quad (17)$$

$$SSW_{X_1} = \sum_{h=1}^{L_1} N_h \sigma_h^2 \quad (18)$$

$$SSW_{X_2} = \sum_{h=1}^{L_2} N_h \sigma_h^2 \quad (19)$$

式中:  $q$  为空间分异程度;  $h=1, 2, \dots, L$ , 为变量  $Y$ 、因子  $X$  的分层;  $N_h$  和  $N$  分别为第  $h$  层和研究对象全区单元数;  $\sigma_h^2$  和  $\sigma^2$  分别为第  $h$  层和  $Y$  的方差;  $SSW$  和  $SST$  分别为层内方差之和、全区总方差;  $F$  用于统计两因子对高温热浪空间分布影响是否具有显著差异。

### 5.2.1 生态探测

置信水平为 95% 时, 各影响因素的生态探测结果如表 4 所示。表 4 中  $Y$  表示因子组合对最高温空间分布的影响存在显著性差异,  $N$  表示不存在显著性差异。常住人口与死亡率、第二、三产业、一般公共财政预算、每千人拥有医生数对最高温空间分布存在显著性差异。其余部分因子和因子之间的结果表现为  $N$ , 表明对最高温的空间分布不存在显著性差异。

### 5.2.2 交互作用探测

交互探测主要用于分析其中某两个因子对最高温共同作用时的结果, 对所选取的 9 个进行交互探测, 出现两种交互结果: 一种是双因子增强, 即两个因子共同对最高温的作用影响程度大于两个因子单独作用时的最大值; 一种是非线性增强, 即两个因子共同对最高温的作用影响程度大于两个因子单独作用时的影响程度之和。

表 4 生态探测结果分析(95%置信水平)

变量	常住人口	死亡率	GDP	第二产业	第三产业	建成区绿地覆盖率	一般公共财政预算收入	固定电话用户	每千人拥有医生数
常住人口									
死亡率	Y								
GDP	N	N							
第二产业	Y	N	N						
第三产业	Y	N	N	N					
建成区绿地覆盖率	N	N	N	N	N				
一般公共财政预算收入	Y	N	N	N	N	N			
固定电话用户	N	N	N	N	N	N	N		
每千人拥有医生数	Y	N	N	N	N	N	N	N	

注:  $Y$  指行变量对因变量  $Y$  的影响大于列变量对因变量  $Y$  的影响;  $N$  指行变量对因变量  $Y$  的影响小于列变量对因变量  $Y$  的影响。

两变量的交互作用对最高温的解释能力如表 5 所示,根据结果可知每两个变量间对最高温的解释都为非独立的,且均为增强对最高温的解释能力,大多数呈现双因子增强,部分增强情况为非线性。如图 10 所示,多数变量两者间的共同作用对 Y 的解释程度均远大于变量单独对 Y 的解释程度。

表 5 交互探测结果

变量	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>
X <sub>1</sub>									
X <sub>2</sub>									
X <sub>3</sub>									
X <sub>4</sub>									
X <sub>5</sub>									
X <sub>6</sub>									
X <sub>7</sub>									
X <sub>8</sub>									
X <sub>9</sub>									

注: 表示双因子增强; 表示非线性增强。

### 5.2.3 因子探测

$q$  代表该变量对最高温的空间分异解释程度,取值范围为  $0 < q < 1$ ,越接近 1 则其解释程度也越大。根据因子探测结果(表 6),将  $q$  由大到小进行排序可以得出:常住人口和固定电话用户的  $q > 0.5$ ,是影响高温热浪的主要因素。GDP、建成区绿地覆盖率、第二产业、一般公共财政预算收入、每千人拥有医生数、死亡率的  $q$  介于  $0.3 \sim 0.5$ ,是影响高温热浪的次要因素。第三产业的  $q$  较低,对高温热浪的影响较弱。

## 6 结论与建议

### 6.1 结论

本文通过构建高温热浪脆弱性评估体系研究福州与厦门高温热浪的异同,并基于地理加权回归和地理探测器模型分析了高温热浪的影响因素,研究结果如下。

(1) 基于 2013—2022 年相关指标数据,构建高

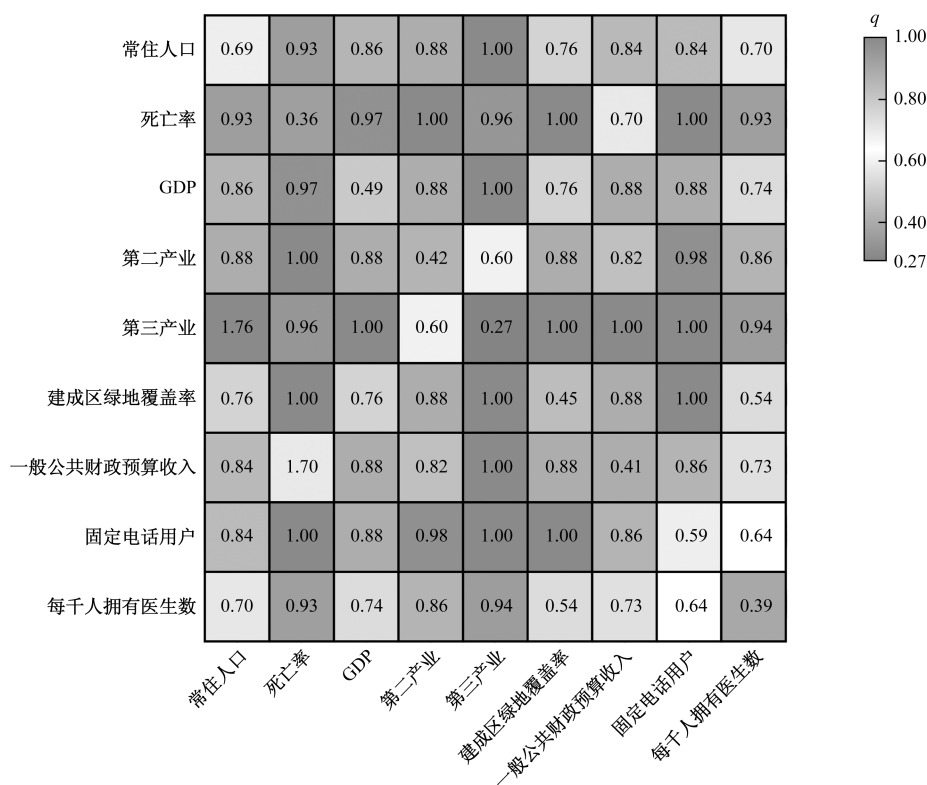


图 10 交互探测结果

表 6 因子探测结果

变量	常住人口	死亡率	GDP	第二产业	第三产业	建成区绿地覆盖率	一般公共财政预算收入	固定电话用户	每千人拥有医生数
$q$	0.687	0.36	0.487	0.422	0.273	0.452	0.406	0.592	0.389
$P$	0.116	0.859	0.618	0.728	0.898	0.534	0.811	0.327	0.204
排序	1	8	3	5	9	4	6	2	7

温热浪脆弱性评估体系,通过计算结果可以看出,福州的适应性水平较高,敏感性在逐年下降,暴露性大致波动上升。厦门风险暴露性和脆弱性同步增减,而敏感性和适应性均在逐年降低。综合来看,福州、厦门均存在较高的脆弱性,且厦门的脆弱性略高于福州。两市的评估指标均呈现明显的差异性,福州指标变化较为复杂,而厦门的脆弱性和暴露性呈上升趋势,体现近 10 年来厦门受高温热浪影响在逐年增大,而敏感性和适应性却在降低。两市脆弱性得分在 2020 年达到一个峰值后,下降又上升,说明高温天气仍将持续影响两市的日常生产生活。

(2)根据 MGWR 模型结果得出对高温热浪影响程度最大的因素为 GDP 和第三产业,常住人口和一般公共财政预算总收入是影响高温热浪的主要因素。相关系数结果显示 GDP 和一般公共财政预算总收入回归系数为负,其余指标回归系数为正。说明在绿化和城市建设方面加大经济投入,能够更有效地预防高温天气。

(3)变量间的相互作用对最高温的解释能力为非独立,均体现为增强。根据地理探测器结果,大多数变量交互作用为双因子增强,常住人口和经济发展水平对最高温空间分异解释程度最大。

## 6.2 建议与讨论

福州和厦门是福建省经济强市,两市地理位置和气候具有较高相似度,拥有不同地貌,在水路分布和发展水平上也有差异。两市高温热浪呈现较高脆弱性,其诱发原因和治理手段上既存在相似之处也存在差异。综合来说,高温热浪的防范与治理需要进一步增加城市绿化,加强水利设施建设,增设公共区域防晒设施,对建筑物进行隔热改造并优化建筑分布格局确保居民在高温热浪时的舒适度。缩小城乡发展差距,优化人口分布,降低人口密集程度对诱发高温的影响。合理规划铁路建设及水系开发,限制工地的用地开发,减少绿地破坏,最大程度保留绿地完整性、植被高覆盖率,以降低高温热浪风险<sup>[28]</sup>。同时要提高创新能力,研发并使用新型绿色建筑材料,利用高反照率材料有效为城市降温<sup>[29]</sup>;推动绿色产业发展,帮助传统企业转型升级,减少有害气体等排放。本文通过地理加权回归模型和地理探测器对影响高温热浪的因素进行探究,指标体系参考前人研究,因部分数据缺失,存在指标构建不够全面问题,今后可通过进一步寻找数据构建更加完善指标体系,以更好地探究影响高温热浪的其他因素。

## 参考文献

- [1] 金星星, 祁新华, 陆玉麒, 等. 福建省高温热浪风险评估与空间分异研究[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(12): 1820-1829.
- [2] 杨林川, 杨皓森, 范强雪, 等. 大城市高温热浪脆弱性评价及规划应对研究——以成都市为例[J]. 规划师, 2023, 39(2): 38-45.
- [3] 武夕琳, 刘庆生, 刘高焕, 等. 高温热浪风险评估研究综述[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(7): 1029-1039.
- [4] 刘嘉慧敏, 郑然, 娄盼星, 等. 2017 年 7 月陕西高温热浪天气成因及前期信号初探[J]. 干旱气象, 2019, 37(2): 233-242.
- [5] 鹿文涵, 刘寿东, 钱燕珍, 等. 1956—2016 年宁波高温热浪事件变化特征及其影响因子分析[J]. 科技通报, 2019, 35(4): 54-59.
- [6] 王岍, 臧鑫宇, 李瑶. 城市既有街区生态韧性与高温热浪扰动的耦合模拟与优化策略研究[J]. 建筑学报, 2023, (S1): 128-133.
- [7] 杨林川, 杨皓森, 范强雪, 等. 大城市高温热浪脆弱性评价及规划应对研究——以成都市为例[J]. 规划师, 2023, 39(2): 38-45.
- [8] 李扬, 刘昌新, 宋瑶. 高温热浪频发对经济系统影响的研究进展[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(1): 121-130.
- [9] 刘金平, 任艳群, 陶辉, 等. 中国高温热浪对碳排放量的响应[J]. 中国环境科学, 2022, 42(1): 415-424.
- [10] 郝增超, 张璇, 郝芳华, 等. 2022 年夏季长江流域复合高温干旱事件的影响及应对[J]. 水资源保护, 2023, 39(6): 46-52.
- [11] SUTANTO S J, VITOLO C, DI NAPOLI C, et al. Heatwaves, droughts and fires: exploring compound and cascading dry hazards at the pan-European scale[J]. Environment International, 2020, 134: 105276.
- [12] ROMANELLO M, DI NAPOLI C, GREEN C, et al. The 2023 report of the Lancet Countdown on health and climate change: the imperative for a health-centred response in a world facing irreversible harms[J]. The Lancet, 2023, 402: 2346-2394.
- [13] 王斌, 王咏薇, 杨大虎. 高反照率城市建筑对城市高温及人体健康的影响[J]. 气象科学, 2022, 42(6): 754-768.
- [14] 付桂琴, 陆倩, 张亚男. 石家庄高温、热浪和闷热天气对心脑血管疾病死亡人数的影响[J]. 气象学报, 2022(3): 403-409.
- [15] 梁东成. 中国“新四大火炉”城市[J]. 地理教育, 2013(9): 62.
- [16] 邓红卫, 李艺. 基于 VSD-云物元模型的长沙市水资源脆弱性评价及障碍因子诊断[J]. 水土保持通报, 2023, 43(6): 174-184.
- [17] 张峻, 万其林, 邵景安. 基于熵权法——PSR 模型的重庆市大气污染治理政策效果评价[J]. 环境科学导刊, 2024, 43(3): 89-96.
- [18] 孔心雨, 孙颖娜. 基于 GIS 的哈尔滨市洪灾风险评价

- [J]. 水利科技与经济, 2024, 30(5): 95-100.
- [19] 黄敏, 陈嘉洪. 基于 ISM 和 AHP 的城乡结合部公众突发公共卫生事件风险感知关键影响因素分析[J]. 安全与环境工程, 2024, 31(3): 47-53.
- [20] 商佳璐, 叶怡馨, 汪轩, 等. 层次分析-正交试验-多指标综合加权评价法优选仙芎骨康颗粒的提取工艺[J]. 时珍国医国药, 2024, 35(4): 869-872.
- [21] 何苗, 徐永明, 莫亚萍, 等. 基于多源遥感数据的北京市高温热浪风险综合评估[J]. 地理科学, 2023, 43(7): 1270-1280.
- [22] 颜金彪. 地理加权各向异性回归模型与方法研究[D]. 南昌: 江西师范大学, 2023.
- [23] 王璐, 邱国新. 基于 MGWR 模型的合肥市住宅市场价格因素分析[J]. 黑河学院学报, 2024, 15(05): 61-64.
- [24] 李慧庆. 城市建成环境对共享单车出行特征影响机制研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2023.
- [25] 强欢欢, 王慧, 雷书雨. 基于 MGWR 模型的大城市房价空间分异特征及影响因素分析——以南京市主城区为例[J]. 现代城市研究, 2024(4): 109-116.
- [26] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017(1): 116-134.
- [27] 郭帅龙, 杨建欣, 马长乐, 等. 基于地理探测器和 GIS 的云南省传统村落空间分布格局及其影响因素研究[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2024, 44(2): 69-78.
- [28] 沈中健, 赵亚琛. 济南市主城区空间形态对地表温度影响的交互关系及空间效应[J]. 干旱区资源与环境, 2024, 38(3): 65-74.
- [29] 王斌, 王咏薇, 杨大虎. 高反照率城市建筑对城市高温及人体健康的影响[J]. 气象科学, 2022, 42(6): 754-768.

## Research on the Statistical Assessment and Influencing Factors of Heat Wave Risk in Fuxia City Based on Multi-source Data

SU Yan<sup>1</sup>, CHANG Kangwei<sup>1</sup>, CHEN Yiling<sup>1</sup>, KUANG Kaijin<sup>1</sup>, LI Hengrong<sup>2</sup>

(1. College of Finance, Fujian Jiang Xia University, Fuzhou 350108, China;

2. Straits Institute of Economics and Finance, Fujian Jiang Xia University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** Utilizing data from Fuzhou and Xiamen in Fujian Province from 2013 to 2022, extreme heat waves were employed as the focal point to conduct a comprehensive statistical assessment of vulnerability across three dimensions such as risk exposure, sensitivity and adaptability. Furthermore, the influencing factors of extreme heat waves were examined using geographically weighted regression and geographic detector models. The findings reveal that disparities in geographical environmental conditions and socio-economic development levels between Fuzhou and Xiamen have resulted in varying degrees of extreme heat waves in both cities, with Xiamen demonstrating heightened vulnerability across multiple indicators. The resident population size, level of economic development and green space coverage within urban areas exert significant influence on extreme heat waves. Specifically, GDP and green space coverage yield negative impacts while the resident population yields positive effects. Additionally, financial resources and technological infrastructure also moderately impact the occurrence of extreme heat waves in both cities. Therefore, amidst global climate change and frequent meteorological disasters, optimizing population distribution alongside waterways is imperative along with augmenting urban greening initiatives to enhance vegetation coverage rates while concurrently improving infrastructure construction to ensure economic development aligns harmoniously with ecological benefits.

**Keywords:** heat wave; vulnerability measurement; geographical weighted regression; geographic detector