

doi: 10.11731/j.issn.1673-493x.2018.09.025

火灾发生率空间分异及影响因素研究

杨尧 李功权

(长江大学 地球科学学院 湖北 武汉 430100)

摘要: 为了探究我国火灾空间聚集特征与影响因素的空间异质性,采用全局莫兰指数、局部莫兰指数、逐步回归模型、地理加权回归模型、地理探测器方法对我国地级市单元进行研究。研究表明:我国火灾发生率具有显著的聚集性;我国火灾发生率较低的“冷点”区域有1个,火灾发生率较高的“热点”区域有4个;人均GDP、城镇居民人均可支配收入、人口密度、年平均气温4个因素的影响效应具有空间异质性。人均GDP与火灾发生率为正相关,另外3影响因素对火灾发生率的作用表现出正负2种相关关系;2因素交互作用要比单因素作用于火灾发生率时影响力更显著,各影响因素的交互作用类型有非线性增强型和双因子增强型2种。

关键词: 火灾发生率;空间异质性;莫兰指数;地理探测器;地理加权回归

中图分类号: X921; TU998.1 文献标志码: A 文章编号: 1673-193X(2018)-09-0158-06

Study on spatial differentiation and influencing factors of fire incidence

YANG Yao, LI Gongquan

(School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan Hubei 430000, China)

Abstract: In order to explore the spatial accumulation characteristics and the spatial heterogeneity of influencing factors of fire in China, the units of prefecture-level city in China were studied by using the methods of global Moran's I, local Moran's I, stepwise regression model, geographically weighted regression (GWR) model and GeoDetector. The results showed that the fire incidence in China presented the significant aggregation. There existed one "cold spot" area with low fire incidence and four "hot spot" areas with high fire incidence in China. The influence effect of four factors including GDP per capita, urban per capita disposable income, population density and annual mean temperature had the spatial heterogeneity. There was a positive correlation between GDP per capita and fire incidence, while the action of other three influencing factors on the fire incidence presented both the positive and negative correlation. The interaction between two factors had more significant influence on the fire incidence than single factor, and the interaction types between the factors included the nonlinear enhancement and the bi-factor enhancement.

Key words: fire incidence; spatial heterogeneity; Moran's I; GeoDetector; geographically weighted regression (GWR)

0 引言

空间分异是自然和社会经济过程的空间表现,也是自亚里士多德以来人类认识自然的重要途径。火灾是一种复杂的社会经济现象,根据《中国消防年鉴》(2007—2016)的统计,2007—2016年全国共发生火灾228.14万起,死亡人数15 124人,事故造成直接财产损失283.92亿元^[1]。火灾对人民群众的生命财产安全造成严重威胁,因此,掌握火灾发生规律和特点,做出科学的判断和决策来避免其给人类带来的危害显得尤为

重要。

目前,在以地理学视角的火灾研究中,Agency等^[2]将空间特征与火灾的发展趋势相结合,以解释空间区域的火灾危险度;银洁琼等^[3]以空间视角来研究森林火灾,利用GIS可视化直观地反映火灾分散或聚集的特征;傅永财等^[4]通过全局自相关分析,发现我国2000—2009年火灾存在空间自相关和聚集现象。火灾空间分布的相关研究已经取得了一系列成果,但仍然存在不足。首先,研究涉及到的火灾数据时间较早,不能满足对当前火灾形势的判断;其次,在研究火灾空间格局影

收稿日期: 2018-04-11

作者简介: 杨尧,硕士研究生,主要研究方向为GIS应用与开发。

通信作者: 李功权,博士,副教授,主要研究方向为储层表征、数字油藏、GIS应用。

响因素时多从全局的角度去探讨,假设地理单元具有空间同质性,这往往掩盖地理单元空间异质性的影响。因此,本文通过全局自相关、局部自相关研究火灾空间分布模式,通过地理加权回归、地理探测器研究影响因素的空间异质性,以期得到具有实际应用价值的结果。

1 数据来源及研究方法

1.1 数据来源

经过查找与整理,综合各类指标数据发现,可以找到的最新数据来源于各类统计年鉴(2014版)。其中火灾数据来自《中国消防年鉴》(2014),经济与社会数据来自《中国区域经济统计年鉴》(2014),气象数据来自于中国气象数据网。本文研究区域为我国4个直辖市以及332地级行政区(地级市292个,地区7个,自治州30个,盟3个,不含港、澳、台地区,不含6个省属直辖市,其中海南省只包含2个地级市)共计336个单元。

1.2 研究方法

全局莫兰指数由 Moran^[5] 于 1950 年提出,该指数在数学意义上对地理学第一定律进行了解释:任何事物间均存在相关性,距离近的事物比距离远的事物相关性要高^[6]。空间自相关可以测量单元属性值的聚集程度,公式为:

$$Moran's\ I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S_0 S^2} \quad (1)$$

式中: n 为研究区域内单元总数,个; W_{ij} 为空间权重; x_i 和 x_j 分别为单元 i 和单元 j 的火灾发生率; \bar{x} 是火灾发生率的平均值。

局部莫兰指数由 Anselin^[7] 于 1995 年提出,用来测量单元 i 与其相邻单元之间关联程度,当指数为正时,表示高值被高值所包围(H-H),或低值被低值所包围(L-L);当指数为负时,表示低值被高值包围(L-H),或高值被低值包围(H-L)。

地理加权回归(Geographic Weighted Regression, GWR)是 Fotheringham 等^[8] 基于局部平滑思想提出的空间回归方法。GWR 为每个单元进行了独立的方程构建,将数据的空间属性纳入回归模型,使变量间的关系随空间位置的变化而变化,从而反映参数在不同单元的空间非平稳性^[9]。模型为:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \beta_1(u_i, v_i)x_{1i} + \beta_2(u_i, v_i)x_{2i} + \dots + \beta_p(u_i, v_i)x_{pi} + \varepsilon_i \quad (2)$$

式中: y_i 为样本 i 的因变量; β_0 为截距; x_{pi} 为样本 i 的第 p 个自变量; (u_i, v_i) 为样本 i 的空间坐标; $\beta_p(u_i, v_i)$ 为样本 i 的第 p 个自变量的系数; ε_i 为随机误差项。

地理探测器是探测空间分异性,以及揭示其背后驱动因子的一种新的统计学方法^[10],该方法最早应用于致病因子的探索,通过分析疾病发生率在不同地理单元

中的空间分异性,可以探测疾病发生的主要驱动因子^[11]。利用这一思想,近年来学者将地理探测器用于城市化形成机理^[12]和耕地复种指数影响^[13]等领域。模型为:

$$P_{D,H} = 1 - \frac{1}{n\delta_H^2} \sum_{i=1}^m n_{D_i} \delta_{H_{D_i}}^2 \quad (3)$$

式中: $P_{D,H}$ 为火灾发生率影响因素解释力指标,取值范围为 0~1, $P_{D,H}$ 值越大,说明影响因素对火灾发生率的解释力越强,反之越弱。

交互作用探测的目的是评估影响因素 X_1 和 X_2 共同起作用时是否会增加或减弱对火灾发生率 Y 的解释力,或这些因素对火灾发生率 Y 的影响是否是独立的^[14]。

2 结果分析

2.1 中国火灾发生率空间格局

利用 GIS 强大的制图表达能力,将我国各单元火灾发生率在地图上进行色彩分级渲染,得到火灾发生率空间分布图(见图 1)。可以看出,各单元火灾发生率存在明显的地域差异。总体上,火灾发生率高的单元位于我国的西北部与东部沿海区域,火灾发生率低单元则位于西藏自治区和中西部大部分区域。其中,火灾发生率较高的地级行政区有新疆维吾尔自治区的博尔塔拉蒙古自治州、巴音郭勒蒙古自治州、昌吉回族自治州、吐鲁番市;宁夏回族自治区的中卫市、石嘴山市;内蒙古自治区的包头市、呼和浩特市、乌海市;辽宁省的盘锦市、阜新市、沈阳市、辽阳市;广东省的中山市、珠海市以及浙江省大部分城市。

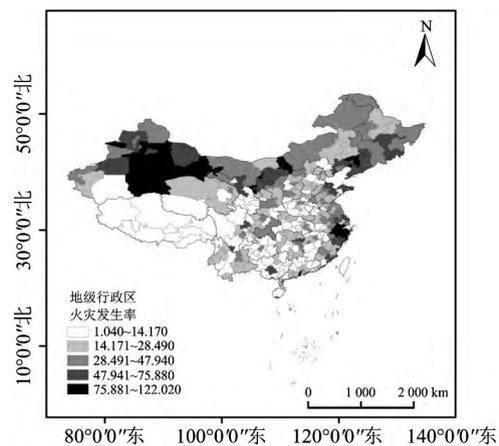


图 1 火灾发生率空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of fire incidence in China

为了定量分析我国火灾发生率空间分布模式,对火灾发生率进行全局自相关检验。表 1 为火灾发生率全局自相关检验结果,可以看出,我国火灾发生率 Moran's I=0.285,且 Z 值大于 1.96,通过了 P 小于 0.01 的检验,实验结果在 99.9% 置信度下是显著的,表明我国火

灾发生率存在显著的空间自相关,具有明显的空间聚集特征,火灾发生率高的单元与火灾发生率高的单元相邻接,火灾发生率低单元与火灾发生率低单元相邻接。

表 1 火灾发生率全局自相关检验

Table 1 Global autocorrelation test of fire incidence in China

Moran's I 指数	预期期望	方差	Z 值得分	P 值
0.285	-0.002	0.0002	19.172	0.000

虽得到了我国火灾发生率存在空间聚集现象的结论,但是聚集现象发生在何处、局部地区是否存在异常值等问题需要通过局部自相关进行分析。局部自相关可以得出 4 种局部聚集模式: High-High 表示单元本身和其邻接的单元火灾发生率都高; Low-Low 表示单元本身与其邻接的单元火灾发生率都低; High-Low 表示火灾发生率高的单元被火灾发生率低单元所包围; Low-High 表示火灾发生率低单元被火灾发生率高的单元所包围。High-High, Low-Low 即为“热点”、“冷点”区域,而 Low-High 和 High-Low 区域是应该关注的“异常值”。

对各单元火灾发生率进行“冷热点”分析得到图 2,从图可知,我国火灾发生率存在 1 个“冷点”区域,包括河南省、湖北省、湖南省、广西壮族自治区、四川省、重庆市、贵州省、云南省、青海省南部、广东江西省西部的我国中西部区域;存在 4 个“热点”区域,包括新疆维吾尔自治区西部和内蒙古自治州东部地区、“东北”地区、山东省东部半岛地区、浙江省及周边地区。

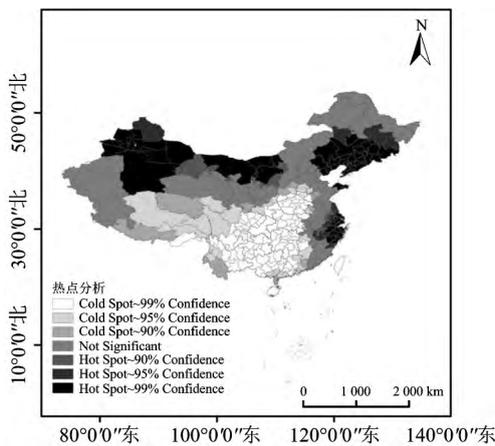


图 2 火灾发生率热点分析

Fig. 2 Spatial cluster of fire incidence in China

我国 High-Low 区域共有 20 个单元,其中直辖市、省会城市及相邻接卫星城市占总数的 55%。也就是说,在我国被火灾发生率低单元所包围的火灾发生率高的单元超过半数,为直辖市、省会城市及其周边卫星城市,这些单元在各自省内经济较为发达、人口稠密,对省内

各市来说具有绝对的经济、政治、文化优势,因此火灾发生率要高于其他单元。这 20 个 High-Low 单元分别是临汾市、郑州市、菏泽市、西安市、淮北市、巴中市、重庆市、成都市、德阳市、乐山市、武汉市、黄山市、长沙市、湘潭市、株洲市、新余市、攀枝花市、昆明市、贵阳市和南宁市。我国 Low-High 区域共有 10 个单元,这些单元是高火灾发生率聚集区里火灾发生率较低的单元,这 10 个 Low-High 单元分别是东北部的绥化市、兴安盟、通辽市、赤峰市、承德市;北部的巴彦淖尔市、金昌市、嘉峪关市;东部的苏州市、宁德市。

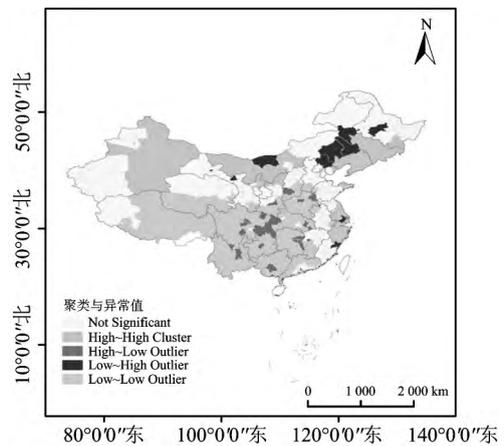


图 3 火灾发生率聚类和异常值分析

Fig. 3 Spatial cluster and outlier of fire incidence in China

2.2 影响因素分析模型

2.2.1 影响因素变量选取

我国火灾发生率空间格局的形成受经济、社会、自然等多方面因素的影响,成因复杂,并且各影响因素相互影响,互为因果。本文结合国内外学者相关研究结论,同时考虑到数据的可获取性,尝试从经济因素、社会因素、自然环境特征 3 个维度选取 7 项指标来分析我国火灾发生率空间格局形成的影响因素,如表 2 所示。

表 2 我国火灾发生率空间分异性影响因子体系

Table 2 Detection indices of the influence factors

影响因素	代表变量	单位
经济因素	人均 GDP	元
	城镇居民人均可支配收入	元
社会因素	城镇失业率	%
	人口密度	人/km ²
自然因素	累年年平均气温	℃
	累年年平均相对湿度	%
	累年 20 ~ 次日 20 时平均年降水量	mm

2.2.2 GWR 模型运算结果

由于我国火灾发生率存在明显的空间自相关特征,

因此采用普通最小二乘法(Ordinary Least Squares, OLS)全局回归会使结果存在偏差,应选用地理加权回归模型进行局部回归分析^[15]。为了消除变量的多重共线性,剔除不显著的变量,保留影响显著的变量。首先通过SPSS 22.0软件对7个变量进行逐步回归模型分析,计算结果见表3。结果显示有4个解释变量通过了共线性诊断和显著性检验,分别是人均GDP、年平均气温、城镇居民人均可支配收入、人口密度。

以火灾发生率为因变量,以人均GDP、城镇居民人均可支配收入、人口密度、年平均气温4个变量为自变量,通过ArcGIS 10.5软件对变量进行GWR分析。其中核类型为FIXED,带宽方法为AICc,对各变量系数的均值、最小值、最大值、上四分位值、下四分位值、中位值进行统计,结果见表4。

表3 逐步回归模型运算结果

Table 3 Summary of stepwise regression results

变量	非标准化系数	标准化系数	t	显著性
人均GDP/元	0.001	0.221	3.282	0.001
城镇居民人均可支配收入/元	0.002	0.461	5.904	0.000
人口密度/(人·km ⁻²)	-0.010	-0.206	-3.485	0.001
年平均气温/°C	-1.106	-0.252	-4.968	0.000
常数项	-6.413	—	-1.069	0.286
R ²	0.350			
校正R ²	0.342			
F值	44.576			
显著性	0.000			

表4 地理加权回归模型运算结果

Table 4 Summary of GWR results

变量	均值	最小值	上四分位值	中位值	下四分位值	最大值
人均GDP/元	0.000 16	0.000 04	0.000 11	0.000 14	0.000 20	0.000 60
城镇居民人均可支配收入/元	0.001 86	-0.003 72	0.001 81	0.002 17	0.002 35	0.002 77
人口密度/(人·km ⁻²)	-0.010 57	-0.045 27	-0.011 96	-0.010 50	-0.008 40	0.003 01
年平均气温/°C	-0.862 36	-1.454 90	-1.225 90	-1.006 90	-0.749 13	2.421 30
常数项	-7.217 60	-19.077 00	-14.782 00	-11.081 00	-6.099 50	81.605 00
R ²	0.448 22					
校正R ²	0.420 59					
AICc	2 860.33					

2.3 影响因素分析

2.3.1 人均GDP与城镇居民人均可支配收入

图4为GWR模型影响因素回归系数空间分布情况。模型结果显示,人均GDP与火灾发生率呈正相关,即人均GDP越高的单元,其火灾发生率越高。人均GDP回归系数的绝对值在我国呈现由东到西逐渐增大的空间分布特征如图4(a)所示,说明人均GDP这一影响因素对西部的影响大于东部;回归系数差异明显,说明人均GDP对我国火灾发生率的影响具有较强的空间异质性。已有研究认为,大部分地区火灾发生率会随着经济发展而呈上升趋势,但经济发展到一定程度,火灾发生率会随着经济发展而呈下降趋势,呈现倒“U”曲线,而我国东部地区经济实力强于西部,可能已经接近由正相关转为负相关的阶段,所以东部回归系数绝对值要小于西部。

城镇居民人均可支配收入回归系数如图4(b)所示,回归系数有正有负,负值地区分布在酒泉市、海西蒙古族藏族自治州、玉树藏族自治州、昌都市及以东地区,

表明这些地区城镇居民人均可支配收入的增加会降低火灾发生率。而其他地区则为正值并且由西向东回归系数绝对值逐渐增大,表明这些地区人均可支配收入的增加会提高火灾发生率。虽然人均GDP和城镇居民人均可支配收入同为经济因素,但人均可支配收入数值要小于人均GDP,因此相较于人均GDP,人均可支配收入在对火灾发生率的影响上表现出了“滞后”效应。

一般来说,经济因素对火灾发生率具有双重性,一方面随着经济的发展,人口素质提高,生活质量得到改善,电器、电路、天然气等相关设备安全性能更高,相关操作更加规范,公众防火意识提高,社会火灾防治投入加大,这些都会对火灾发生率起到抑制作用;另一方面,经济的发展也带来了人口与资源的聚集,布料、纸制品、塑料、有机涂料等火灾诱因的增加,增多了火灾隐患,有利于火灾的发生。

2.3.2 人口密度

从模型结果来看,除了西藏省的拉萨市、那曲地区、日喀则市、山南市人口密度回归系数为正外,其余地区

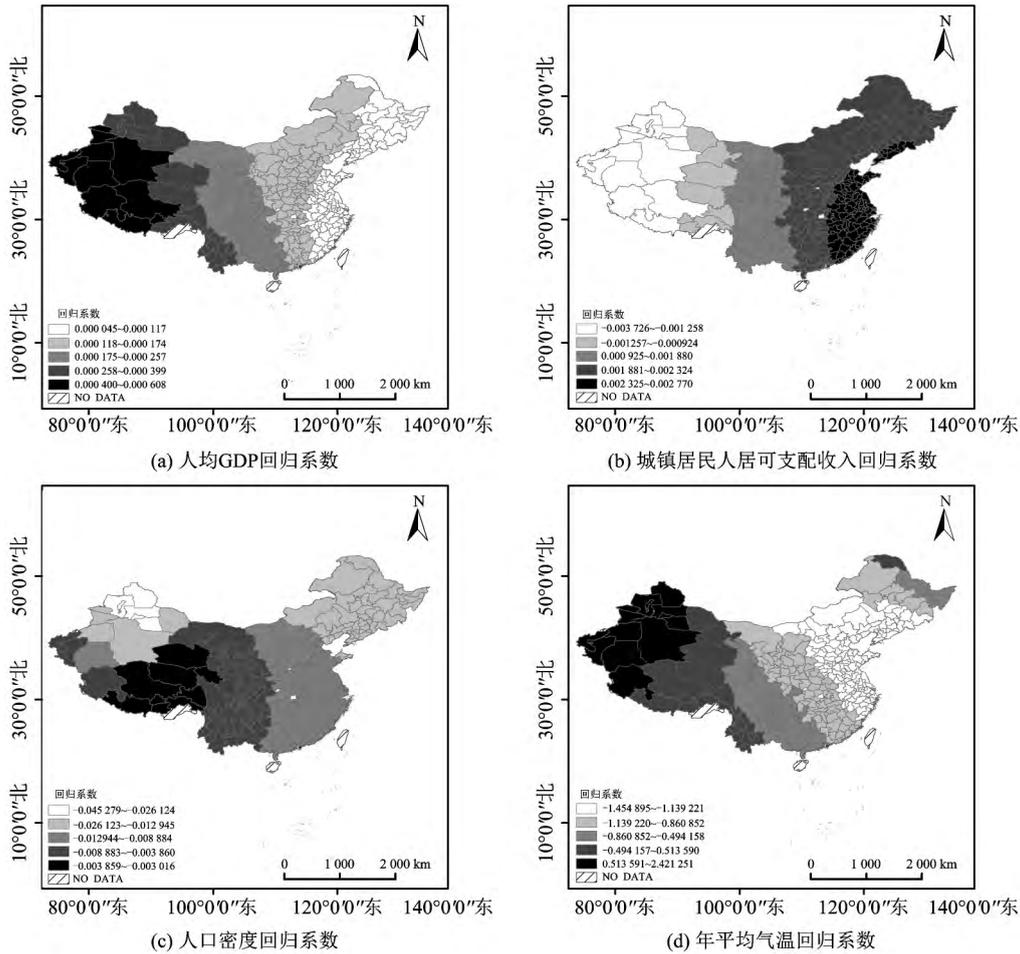


图 4 GWR 模型影响因素回归系数空间分布

Fig. 4 Spatial pattern of coefficient for each evident factor under GWR model

均为负。由于上述 4 个地区人烟过于稀少,火灾发生率对人口数量十分敏感,人口密度的增加极大的增加了火灾发生的可能性。而其余区域,人口密度越大往往社会经济发展也越好,防火设施较为完善,人们防火意识也较强。

2.3.3 年平均气温

模型结果显示,年平均气温回归系数有正有负。西部地区回归系数为正,表明随着气温的升高,火灾发生率也在提高,东部地区回归系数为负,表明气温与火灾发生率为负相关。在我国东部地区,城市化程度高于西部,火灾大多为城市火灾,如不规范使用电器、电路老

化、明火操作不当等,人为因素占据主导,气温这一自然因素对城市火灾影响不大。而我国新疆、西藏、青海省等西部地区,城市化程度低,火灾的发生与气温这一自然因素密切相关,气温越高,火灾发生的可能性也越高。

2.4 影响因素交互作用

GWR 模型分析影响因素时,仅限于各因素单独作用。利用地理探测器的交互作用探测器可以研究影响因素间的交互作用。影响因素之间交互作用的结果显示(见表 5),人均 GDP 与城镇居民人均可支配收入交互作用为双因子增强,表示 2 影响因素交互作用的影响力要大于 2 因素解释力之中最大值。其余交互作用为非

表 5 影响因素交互结果
Table 5 Results of interaction detecting

变量	人均 GDP	可支配收入	人口密度	气温
人均 GDP	0.305 306 633			
可支配收入	双因子增强	0.244 135 613		
人口密度	非线性增强	非线性增强	0.019 929 845	
气温	非线性增强	非线性增强	非线性增强	0.110 046 049

线性增强,表示2个影响因素交互作用的影响力要强于两者影响力之和。需要指出的是,这一发现表明,这些影响因素的交互作用均大于单一因素单独作用,由此可见不同影响因素之间交互作用的重要性。同时也说明火灾发生率空间格局是经济、社会、自然共同作用的结果。

3 结论

1) 我国火灾发生率具有显著的聚集性,火灾发生率 Moran's I 指数为 0.285,且通过了 P 小于 0.01 的检验。火灾发生率较低的“冷点”有 1 个,山西以南、江西以西,西藏以东的中西部地区;火灾发生率较高的“热点”有 4 个,包括新疆维吾尔自治区西部和内蒙古自治区东部地区、“东北”地区、山东省东部半岛地区、浙江省及周边地区。在“冷点”区域内有 20 个城市为火灾发生率较周围偏高的城市,其中超过半数均为直辖市、省会城市及其卫星城市;在“热点”区域内有 10 个城市较周围城市来说火灾发生率偏低。

2) 人均 GDP、城镇居民人均可支配收入、人口密度、年平均气温 4 个因素是我国火灾的主要影响因素,其影响效应具有空间异质性。人均 GDP 与火灾发生率呈正相关,其他影响因素在我国均存在正负 2 种相关性。

3) 4 个主要影响因素的交互作用类型有双因子增强型和非线性增强型 2 种,不存在相互独立的因素。除人均 GDP 与城镇居民人均可支配收入的交互作用均呈双因子增强型外,其余交互作用为非线性增强,表示两个影响因素交互作用的影响力要强于两者影响力之和。

4) 仅就中国 2013 年火灾发生率的分布特征及影响因素进行了探讨,但随着我国经济社会的发展,火灾的空间格局和影响机制也将发生较快的变化,因此需要对火灾状况进行动态观测和分析,及时发现新因素和新问题,探讨防灾减灾新机制。

参考文献

[1] 张玉涛,马婷,林姣,等. 2007—2016 年全国重大火灾事故分析及时空分布规律[J]. 西安科技大学学报, 2017, 37(6): 829-836.
ZHANG Yutao, MA Ting, LIN Jiao, et al. Analysis of fire incidents and characteristics of spatio-temporal distributions for serious fires from 2007 to 2016 in China [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2017, 37(6): 829-836.

[2] AGENCY F E M, ADMINISTRATION U S F, CENTER N F D. An NFIRS analysis: investigating city characteristics and residential fire rates [M]. Charleston, South Carolina: Create Space Independent Publishing Platform, 2013.

[3] 银洁琼,陈伟. 湖南省森林火灾空间格局及应急资源空间分布解析[J]. 现代农业科技, 2012, 41(9): 234-237.
YIN Jieqiong, CHEN Wei. Discussion on the space pattern and emergency resources space distribution of forest fire in Hunan province [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2012, 41(9):

234-237.

[4] 傅永财,徐波. 中国近年火灾的空间聚集趋势分析[J]. 消防科学与技术, 2012, 31(4): 411-413.
FU Yongcai, XU Bo. Spatial cluster analysis of Chinese fire statistic [J]. Fire Science and Technology, 2012, 31(4): 411-413.

[5] MORAN P A P. Notes on continuous stochastic phenomena [J]. Biometrika, 1950, 37(1-2): 17-23.

[6] TOBLER W R. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region [J]. Economic Geography, 1970, 46(2): 234-240.

[7] ANSELIN L. Local indicators of spatial association—LISA [J]. Geographical Analysis, 1995, 27(2): 93-115.

[8] FOTHERINGHAM A S, BRUNSDON C. Local forms of spatial analysis [J]. Geographical Analysis, 1999, 31(4): 340-358.

[9] 税伟,杜勇,陈毅萍,等. 基于地理加权回归的茶业种植专业化空间格局及影响因素: 以福建省安溪为例 [J]. 应用生态学报, 2017, 28(4): 1298-1308.
SHUI Wei, DU Yong, CHEN Yiping, et al. Spatial patterns and influence factors of specialization in tea cultivation based on geographically weighted regression model: A case study of Anxi county of Fujian province, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(4): 1298-1308.

[10] 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 Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.

[11] 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.

[12] 刘彦随,杨忍. 中国县域城镇化的空间特征与形成机理 [J]. 地理学报, 2012, 67(8): 1011-1020.
LIU Yansui, YANG Ren. The spatial characteristics and formation mechanism of the county urbanization in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(8): 1011-1020.

[13] 杨忍,刘彦随,陈玉福,等. 环渤海地区耕地复种指数时空变化遥感反演及影响因素探测 [J]. 地理科学, 2013, 33(5): 588-593.
YANG Ren, LIU Yansui, CHEN Yufu, et al. The remote sensing inversion for spatial and temporal changes of multiple cropping index and detection for influencing factors around Bohai Rim in China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(5): 588-593.

[14] 廖颖,王心源,周俊明. 基于地理探测器的大熊猫生境适宜度评价模型及验证 [J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(6): 767-778.
LIAO Ying, WANG Xinyuan, ZHOU Junming. Suitability assessment and validation of giant panda habitat based on geographical detector [J]. Journal of Geoinformation Science, 2016, 18(6): 767-778.

[15] 高晓光. 中国高技术产业创新效率影响因素的空间异质效应: 基于地理加权回归模型的实证研究 [J]. 世界地理研究, 2016, 25(4): 122-131.
GAO Xiaoguang. Spatial heterogeneity effect of the Chinese high technology industry's innovation efficiency factors [J]. World Regional Studies, 2016, 25(4): 122-131.

(责任编辑: 纪婧)