

引用格式:朱伶俐,任红艳,丁凤,等.陕西省HFRS疫情时空分异特征及影响要素研究[J].地球信息科学学报,2020,22(5):1142-1152. [Zhu L L, Ren H Y, Ding F, et al. Spatiotemporal variations and influencing factors of hemorrhagic fever with renal syndrome in Shaanxi Province [J]. Journal of Geo-information Science, 2020,22(5):1142-1152.] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.190420

陕西省HFRS疫情时空分异特征及影响要素研究

朱伶俐^{1,2},任红艳^{1*},丁凤²,鲁亮³,吴思佳^{1,2},崔成^{1,4}

1. 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; 2. 福建师范大学地理科学学院,福州 350007; 3. 中国疾病预防控制中心传染病预防控制所 媒介生物控制室传染病预防控制国家重点实验室,北京 102206; 4. 中国科学院大学资源与环境学院,北京 100190

Spatiotemporal Variations and Influencing Factors of Hemorrhagic Fever with Renal Syndrome in Shaanxi Province

ZHU Lingli^{1,2}, REN Hongyan^{1*}, DING Feng², LU Liang³, WU Sijia^{1,2}, CUI Cheng^{1,4}

1. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 3. State Key Laboratory for Infectious Disease Prevention and Control, Department of Vector Biology and Control, National Institute for Communicable Disease Control and Prevention, Chinese Center for Disease Control and Prevention, Beijing 102206, China; 4. College of Resources and Environment, University of Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: Hemorrhagic Fever with Renal Syndrome (HFRS) is a rodent-borne endemic disease caused by Hantavirus, which poses an increasingly serious threat to public health, especially in China. In this country, Shaanxi Province is one of the top regions with the highest HFRS incidence in the past years. It is of great importance to explore the potential influences on the spatiotemporal variations of HFRS epidemics across this province, which would provide useful clues for local authorities making targeted interventions on this disease. The county-level HFRS incidence rates during 2005-2017, as well as some potential natural and socioeconomic variables, were collected and analyzed by using spatial auto-correlation and hot-spot analysis tools as well as a Geodetector tool to explore the spatiotemporal relationships between the incidence rates and the potential variables. The HFRS epidemics in Shaanxi Province were obviously higher than the national level and presented clear temporal fluctuation and spatial clustering at the county scale. More than 90% of the counties with relatively high HFRS incidence rates concentrated in the Guanzhong Plain where obvious spatial heterogeneity was also observed. Some variables including the percentage of plain area and construction land, and population density separately accounted for about 20% of spatial variations of the county-level epidemic across the whole province. By comparison, the spatial pattern of this epidemic in the Guanzhong Plain with no obvious socioeconomic differences was mainly affected by precipitation, normalized difference vegetation index, and

收稿日期:2019-08-03;修回日期:2020-03-03.

基金项目:国家自然科学基金项目(41571158);资源与环境信息系统国家重点实验室自由探索类项目(O8R8B6A0YA);国家重点研发计划(2016YFC1302602)。[**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No.41571158; State Key Laboratory of Resources and Environment Information Systems, Independent Innovation Project, No.O8R8B6A0YA; National Key Research and Development Program, No.2016YFC1302602.]

作者简介:朱伶俐(1995—),女,江苏泰州人,硕士生,主要从事遥感与GIS应用研究。E-mail: linglizhu321@sina.com

*通讯作者:任红艳(1979—),男,湖南岳阳人,博士,副研究员,主要从事健康地理学相关研究。E-mail: renhy@igsrr.ac.cn

land-use types. Thus, the Guanzhong Plain with both spatially clustering higher incidence rates and obviously differentiated natural and socioeconomic conditions was the crucial region of the HFRS prevalence across Shaanxi Province. We suggest that precipitation, vegetation conditions, and land-use types should be heavily considered by local authorities for making effective interventions on this disease across Shaanxi Province, especially in the Guanzhong Plain with relatively high land urbanization and population density.

Key words: Hemorrhagic Fever with Renal Syndrome (HFRS); spatio-temporal characteristics; influencing factors; Shaanxi Province; Geodetector; Guanzhong Plain; factor detector; interaction detector

*Corresponding author: REN Hongyan, E-mail: renhy@ignrr.ac.cn

摘要:肾综合征出血热(HFRS)主要是由鼠类携带传播汉坦病毒而引起的一类自然疫源性传染病,严重危害着人类健康。陕西省是我国HFRS疫情最严重的省份之一,发病率居全国前列,研究其疫情时空分异和影响要素对指导当地疫情防控具有重要意义。本研究基于2005—2017年县区尺度HFRS发病率数据,采用空间自相关、热点分析等方法分析陕西省疫情时空分异特征,并利用地理探测器探究影响疫情的主要自然环境和社会经济要素。结果表明:2005—2017年陕西省HFRS发病率明显高于全国水平,同时呈现明显的时间波动和空间聚集,平原面积占比、建设用地面积占比、人口密度等因素可以解释约20%的HFRS疫情空间分异;关中平原聚集了陕西省90%以上的高发病县区,其疫情亦呈现明显的空间分异性,主要受降水量、NDVI、土地利用类型等因素的影响。由此可知,高发病县区聚集、且自然环境和社会经济条件明显不同的关中平原是陕西省HFRS疫情流行的关键地区。因此,建议陕西省HFRS疫情防控应当重点关注降水量、植被状况以及土地利用类型,特别是在土地城镇化水平较高、人口密度较大的关中平原进行有效的防控干预。

关键词:HFRS疫情;时空分异;影响要素;地理探测器;陕西省;关中平原;因子探测器;交互探测器

1 引言

肾综合征出血热(Hemorrhagic Fever with Renal Syndrome, HFRS)是一种严重危害人类健康的传染病,主要通过与某些鼠类的尿液、粪便、唾液等接触传播而引起的,临床表现以发热、充血出血和肾脏损伤为主^[1]。HFRS呈世界性流行^[2],中国是HFRS疫情最严重的国家,报告病例数占全世界70%~90%^[3-4],严重威胁了中国的公共健康安全^[4];其中,陕西省是HFRS疫情最严重的省份之一,发病率居全国前列,病例数约占全国10%~25%^[5]。

国内外学者对HFRS疫情的流行特征和影响要素进行了大量研究。HFRS疫情的季节性特征可主要归因于宿主动物种类和活动特性的差异^[6]。我国HFRS疫区主要为姬鼠型和家鼠型混合疫区,姬鼠型为主的疫区发病高峰主要集中在秋冬季(10—次年1月),而家鼠型为主的疫区主要集中在春季(3—5月)^[7]。同时HFRS疫情分布具有明显的空间异质性,且与多种自然环境和社会经济要素有关^[5,8-9]。我国HFRS自然疫源地主要分布在海拔500 m以下的平原和丘陵地区,且在东部季风气候区的温带和亚热带地区更为常见^[10];诸多研究表明,在我国东北三省、山东、内蒙古、陕西、湖南等传统疫区^[5],HFRS疫情在地市/县区尺度上均呈现空间异质性^[7,11-12]。气

象要素^[13-14]、归一化差分植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)^[15]、地形地貌^[16]等自然环境因素在不同程度上影响了鼠类的生存和繁殖环境,进而影响HFRS疫情;而土地利用状况^[17]、国内生产总值(Gross Domestic Product, GDP)、城镇化率^[16,18]等社会经济条件则通过影响人类与鼠类的接触机会进而影响HFRS疫情,在城镇化进程中大型工程建设等可能会破坏鼠类栖息地导致人类与鼠类的接触频繁从而促进HFRS疫情^[16],而医疗卫生水平的提高、疫苗的推广使用则会降低HFRS的感染风险^[19]。

前人针对HFRS疫情的流行特征、影响要素等方面的研究加深了我们对HFRS疫情的了解,然而大多数研究采用的回归统计、机器学习等方法,如多项式分布滞后模型^[18]、增强回归树^[12]、最大熵生态位模型^[16]等,难以揭示HFRS疫情的空间异质性^[8,12],而地理加权回归模型^[5]等虽然能利用回归系数反映影响要素与HFRS疫情关系中的空间变化,但难以揭示影响要素之间的交互作用。鉴于地理探测器可通过探析地理现象的空间分层异质性来揭示其背后的驱动力,能够量化各影响要素及其交互作用的强度^[20],广泛应用于空间分异性的影响要素识别与作用机制的研究中^[21-22]。因此,本研究基于2005—2017年县区尺度HFRS发病率数据,采用空

间自相关、热点分析等方法分析陕西省疫情时空分异特征,并利用地理探测器探析影响疫情的主要自然环境和社会经济要素,以期为陕西省 HFERS 疫情防控提供有价值的信息。

2 研究区概况、数据源与研究方法

2.1 研究区概况

陕西省地处我国内陆腹地(图1),经纬度范围为 $105^{\circ}29'E-111^{\circ}15'E$ 、 $31^{\circ}42'N-39^{\circ}35'N$,总面积 20.56 万 km^2 。2017年常住人口 3835.44 万人,地区生产总值 21898.81 亿元^[23]。全省年均温 $9\sim 16^{\circ}C$,

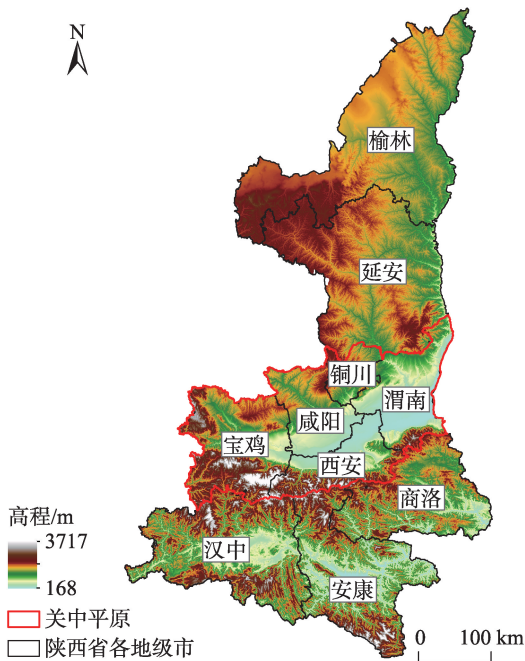


图1 陕西省行政区划

Fig. 1 Administrative division map of Shaanxi Province

年均降水量 $340\sim 1240$ mm。地势南北高、中间低,地形复杂多样,由北至南依次为黄土高原、关中平原和秦巴山地。其中,关中平原包括宝鸡、咸阳、西安、渭南和铜川五市以及杨陵区,聚集了陕西省47%的耕地、63%的人口、65%的地区生产总值^[23],是陕西省主要的粮棉生产基地、人口和社会经济的核心地带。

2.2 数据来源

2005—2017年全国、陕西省以及陕西省107个县区的HFERS年发病率数据均由中国疾病预防控制中心提供,以各年陕西省年发病率为基准,按照年发病率的上下10%、30%和50%对各县区的年发病率进行划分,便于对比不同年份的HFERS高发县区(考虑到HFERS发病率和对应县区的数量,本研究中高发病县区是指高于陕西省年发病率10%的县区)。综合考虑前人研究结果以及数据可获取性,选取了气象要素^[13-14]、景观要素^[15-16]和社会经济要素^[12,16,18]作为陕西省HFERS疫情的潜在影响因子(表1)^[24-25],所有数据均重采样至 1 km。其中土地利用类型选取了一级分类体系中的耕地、林地、水域和建设用地;同时,选取了与鼠类生境密切相关的地形地貌以及土壤质地,其中坡度、坡向和地形起伏度^[26]由数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)计算获取,土壤质地分为砂土、粉砂土和黏土3大类,且每一类均通过百分比来反映不同质地颗粒的含量。

2.3 研究方法

2.3.1 疫情时空格局分析

空间自相关分析常用于描述研究对象的空间分布特点,全局自相关可以反映研究对象在整个区

表1 HFERS发病率分析相关的变量列表

Tab. 1 List of variables used in the HFERS incidence analysis

要素	数据	变量	时间	数据源
气象要素	温度	年均温度	2005—2017	中国气象数据网 data.cma.cn
	降水量	年均降水量	2005—2017	
景观要素	NDVI	年度NDVI	2005—2017	中国科学院资源环境科学数据中 心资源环境数据云平台 www.resdc.cn
	地形因子	DEM、坡度、坡向、地形起伏度	—	
	地貌类型	平原、台地、丘陵、山地	—	
	土壤质地	砂土、粉砂土、黏土	—	
社会经济要素	土地利用类型	耕地、林地、水域、建设用地	2005、2010、2015	
	GDP	公里格网GDP	2005、2010、2015	
	人口密度	公里格网人口密度	2005、2010、2015	

注:年份不全的使用相近年份代替。

域的聚集特征^[27]。本研究利用 Global Moran's I 统计量分析陕西省 HFRS 发病率的时空聚集特性,其计算公式为:

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

式中: n 为研究县区的个数; x_i 、 x_j 分别为研究区 i 和 j 的发病率; \bar{x} 为各县区发病率的均值; W_{ij} 是各县区之间的空间关联矩阵。Moran's I 取值范围为 $[-1, 1]$,统计具有显著性的正值表示发病率呈聚集性,负值表示发病率呈离散性,0值表示不存在空间自相关性。

热点分析(Getis-Ord G_i^*)用于进一步分析陕西省 HFRS 疫情的局部空间自相关特征^[28-29],探测 HFRS 发病率的高值聚集区(热点)和低值聚集区(冷点),其计算公式为:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij} x_j - \bar{x} \sum_{j=1}^n W_{ij}}{S \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n W_{ij}^2 - \left(\sum_{j=1}^n W_{ij}\right)^2}{n-1}}} \quad (2)$$

式中: n 为研究县区的个数; x_j 为研究区 j 的发病率; \bar{x} 为各县区发病率的均值; S 为各县区发病率的标准差; W_{ij} 是各县区之间的空间关联矩阵。 G_i^* 统计结果为 Z 得分和 P 值, Z 得分显著为正表示县区 j 为热点区, Z 值显著为负表示县区 j 为冷点区。

2.3.2 疫情影响要素分析

地理探测器(GeoDetector)是探测和利用空间分异性的工具,其基本思想是:若某个自变量对因变量有重要影响,则二者在空间分布上应该具有相似性^[20,30]。本研究采用地理探测器定量探测不同影响要素及其交互作用对 HFRS 疫情空间分异的影响,其中因子探测器可用于探究影响要素对 HFRS 疫情的解释程度,其解释力用 q 值来度量;交互探测器用来探测影响要素的两两交互作用对 HFRS 疫情的作用强度。地理探测器的计算公式为:

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (3)$$

式中: $h=1, 2, \dots, L$ 为根据某环境要素划分研究区的类别数; N_h 和 N 分别为类 h 和整体对应的县区数量; σ_h 和 σ 分别为类 h 和整体对应的 HFRS 发病率

方差。 q 取值范围为 $[0, 1]$, q 值越大,表明影响要素对疫情的解释力越强。

地理探测器要求输入的变量为类别型变量,需对连续型数据进行离散化处理。自然断点法是减少组内的平均离散方差、增加组间的平均离散方差的自然聚类方法,完全依据数据的分布规律划分,避免了人为因素,在地理探测器的变量分类中应用广泛^[31-32]。因此本研究采用自然断点法划分连续型数据,其中陕西省连续型潜在影响因子划分为5类,关中平原为7类。

3 结果及分析

3.1 陕西省 HFRS 疫情时空格局

2005—2017年陕西省 HFRS 年发病率呈现先保持相对平稳后迅速上升又波动下降的趋势(图2),可大致分为3个时间段:2005—2008年、2009—2012年、2013—2017年;且陕西省 HFRS 年发病率一直明显高于全国水平,尤其是在2010—2012年和2017年;此外,每年高发区县区的数量维持在22个上下浮动。

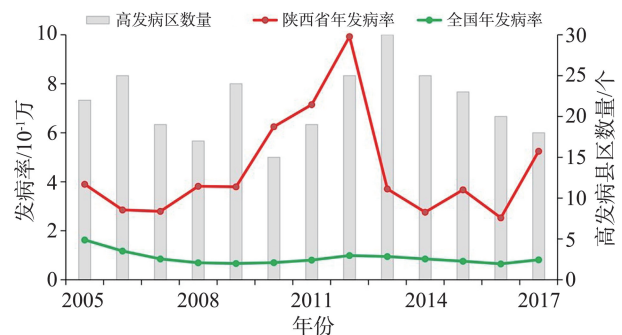


图2 2005—2017年陕西省和全国HFRS年发病率及陕西省高发病区数量

Fig. 2 The HFRS incidence rates in Shaanxi Province and China and the number of counties with 10% higher than the annual incidence in Shaanxi Province from 2005 to 2017

陕西省 HFRS 疫情空间分布聚集性明显(Moran's I 均大于0.2,且 $P<0.01$),90%以上的高发病县区集中在中部的关中平原(图3),如西安市的长安区、周至县和鄠邑区、宝鸡市的扶风县、咸阳市的武功县和兴平市等一直是高发区,而西安市的阎良区、铜川市的宜君县、延安市的黄陵县等也逐渐成为新的高发病县区。这表明陕西省和关中平原 HFRS 疫情均具有空间异质性,且疫情高发区有扩

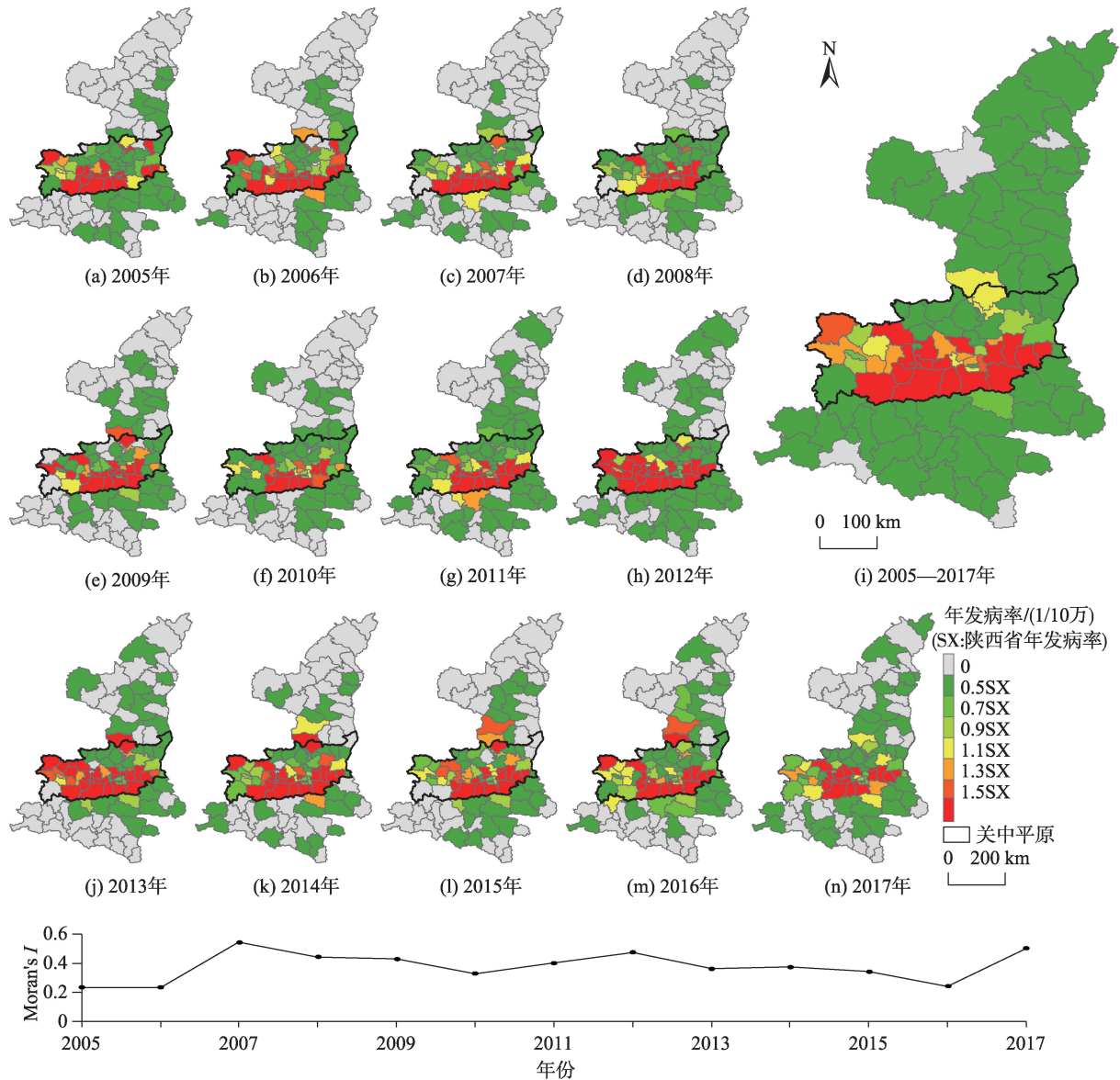


图3 2005—2017年陕西省县区尺度HFERS发病率及全局空间自相关指数

Fig. 3 Yearly distribution of HFERS incidence rates in Shaanxi Province and Global Moran's I from 2005 to 2017

散的趋势。

热点分析结果进一步说明,关中平原是陕西省HFERS疫情高值聚集区,且向其东部扩展(图4)。高值聚集区由西安市与宝鸡市、咸阳市的交界处,向西发展以宝鸡市为核心,后又向东部的西安市和渭南市发展。对陕西省HFERS疫情时空格局的分析表明:2005—2017年,陕西省HFERS发病率高于全国水平且波动明显,并形成了以关中平原为主的疫情高发区且向其东部聚集。

3.2 HFERS疫情影响要素

为了探究影响陕西省HFERS疫情时空分异的环境要素,利用地理探测器对2005—2017年HFERS发

病率和潜在影响因子逐年进行分析。因子探测器结果表明,不同年份HFERS疫情的主导影响因子及其解释力具有明显差异(图5)。2005—2017年,平原面积占比与陕西省HFERS疫情空间分异关系最为密切(均值 q 为0.288),其次是建设用地面积占比(均值 q 为0.218)、人口密度(均值 q 为0.198)、黏土(均值 q 为0.158);且平原面积占比、建设用地面积占比、人口密度和黏土的 q 值在2005—2017年整体呈现上升趋势。

交互探测器结果表明,影响要素的两两交互作用均会增强对陕西省HFERS疫情的解释力。不同年份主导交互作用方式有所差异,表2分别统计了

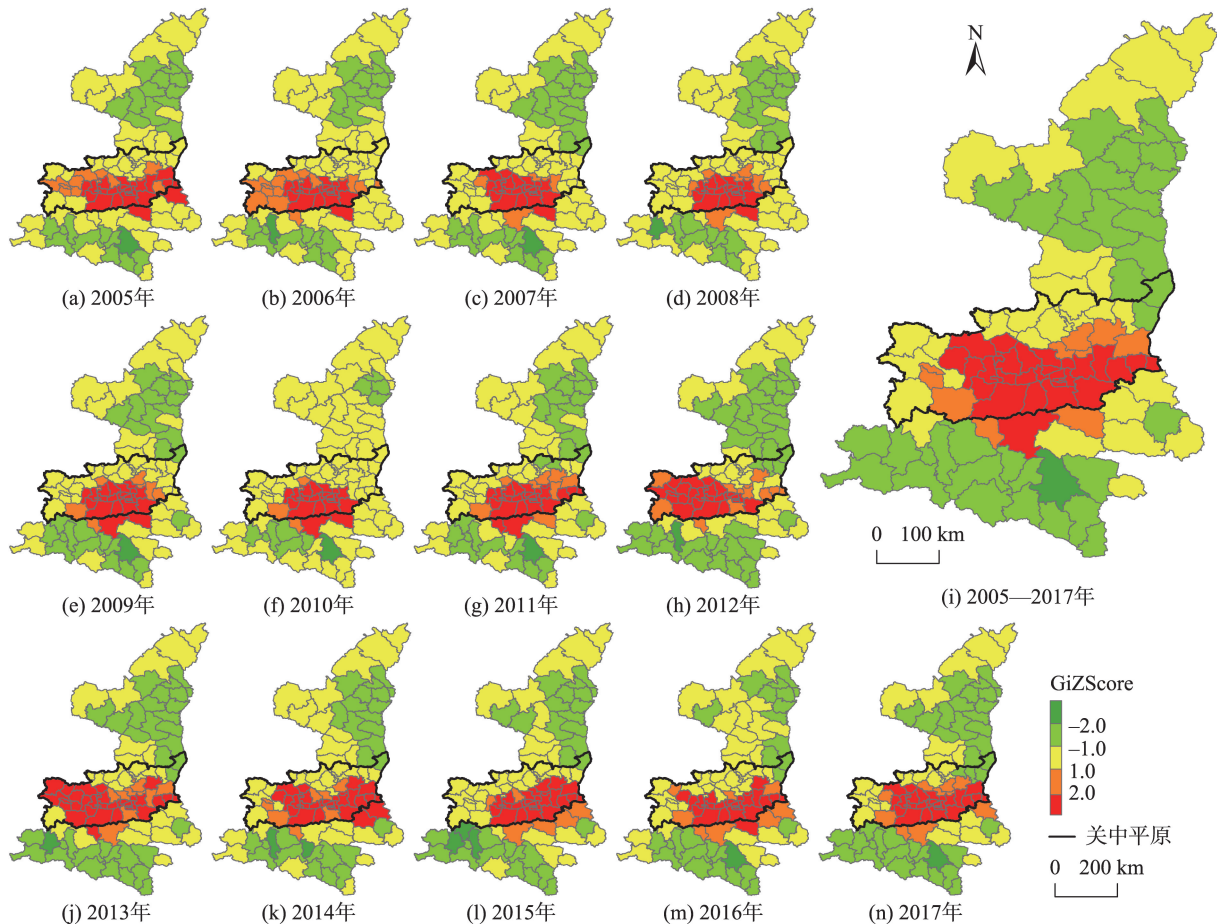


图4 2005—2017年陕西省HFRS发病率热点分布

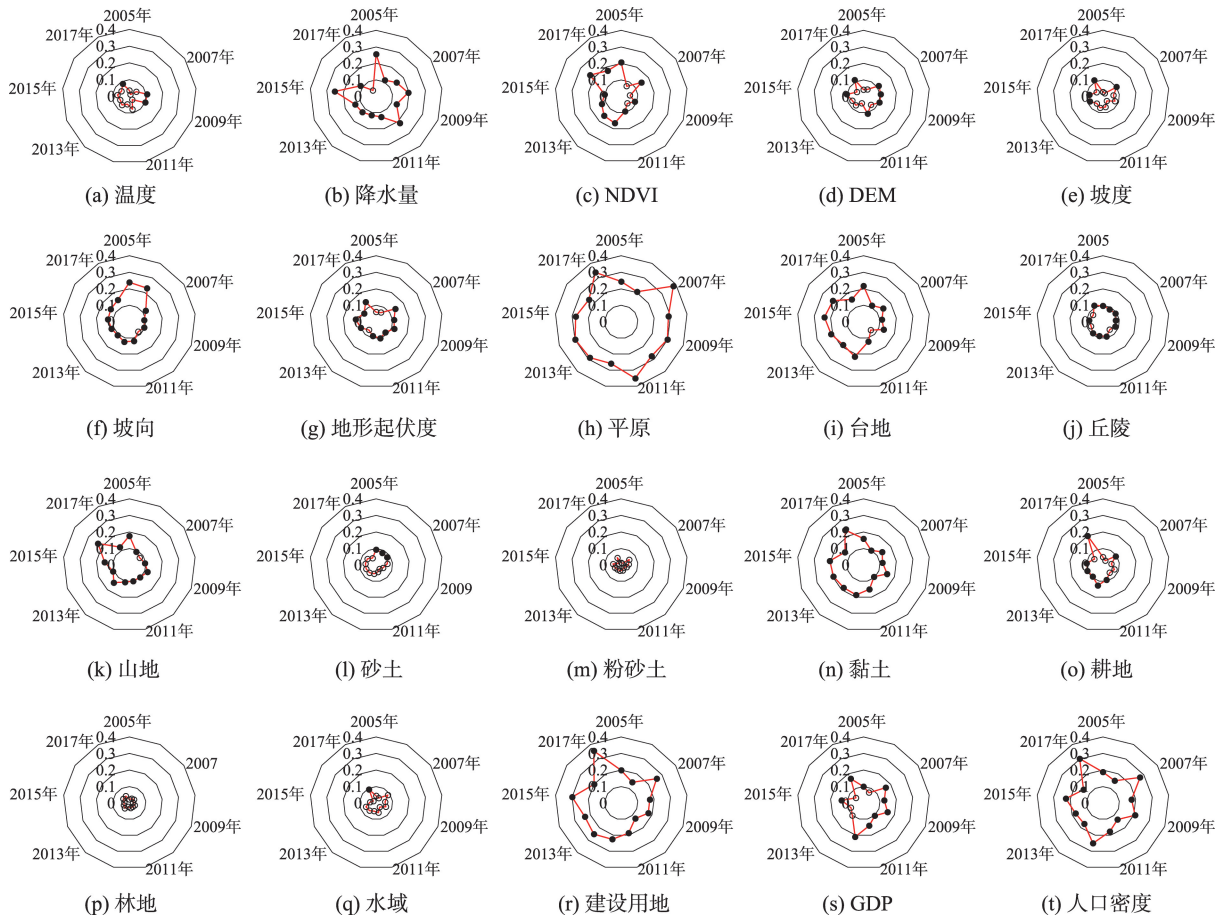
Fig. 4 Yearly distribution of HFRS incidence rates hotspots in Shaanxi Province, from 2005 to 2017

2005—2017年 q 值排在前三的交互作用方式。2005—2017年,平原面积占比分别与温度、降水量、坡度、地形起伏度、林地面积占比等要素的交互作用共同驱动了陕西省HFRS疫情的空间分异,是HFRS疫情的显著控制因子。2005—2008年,林地面积占比与人口密度的交互作用 q 值较高,能够解释该时期约63%的陕西省HFRS疫情;2009—2012年,平原面积占比与坡度、平原面积占比与地形起伏度、平原面积占比与林地面积占比的交互作用 q 值较高,分别能够解释该时期约73%、75%、74%的陕西省HFRS疫情;2013—2017年,平原面积占比与坡度、平原面积占比与温度的交互作用 q 值较高,分别能够解释该时期约66%、64%的陕西省HFRS疫情。因此,陕西省HFRS疫情空间分异主要受到平原面积占比、坡度、黏土等自然环境要素以及建设用地面积占比、人口密度等社会经济要素的影响,且不同年份HFRS疫情的主导因素存在差异。

与此同时,关中平原HFRS疫情空间异质性的

因子探测器结果表明(图6),2005—2017年,降水量、NDVI和水域面积占比与关中平原HFRS疫情关系密切;且多数年份关中平原HFRS疫情影响要素有1~4个显著因子,少数年份(2007、2008、2010、2011年)无显著影响因子。

此外,交互探测器结果表明,影响要素的两两交互作用均会增强对关中平原HFRS疫情的解释力。不同年份主导交互作用方式有所差异,表3分别统计了 q 值排在前三的交互作用方式。2005—2017年,降水量分别与建设用地面积占比、耕地面积占比、黏土等要素的交互作用共同驱动了关中平原HFRS疫情的空间分异,是HFRS疫情的显著控制因子。2005—2008年,降水量和建设用地面积占比的交互作用 q 值较高,能够解释该时期约88%的关中平原HFRS疫情;2009—2012年,降水量与耕地面积占比、降水量与建设用地面积占比、降水量与黏土交互作用 q 值较高,分别能够解释该时期约84%、85%、82%的关中平原HFRS疫情;2013—2017



注:实心点表示具有显著性($P < 0.1$),空心点表示不具有显著性($P > 0.1$)。

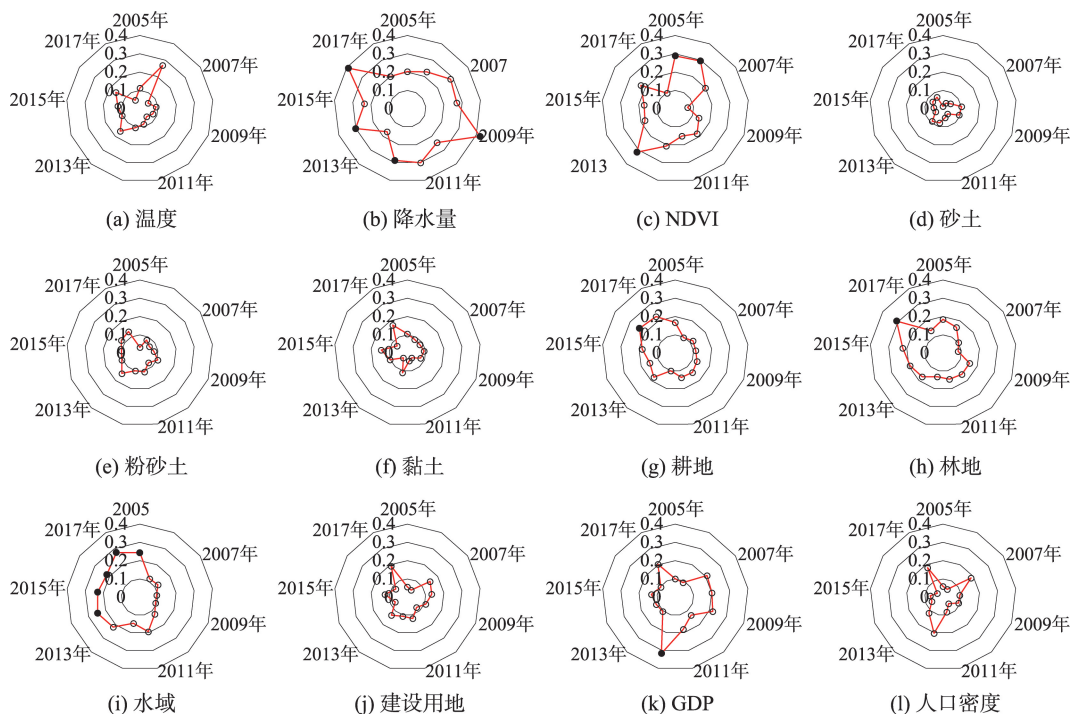
图5 陕西省HFERS疫情各因子 q 值雷达图

Fig. 5 The q value of environmental factors affecting distribution of HFERS incidences in Shaanxi Province

表2 陕西省不同环境变量的交互作用探测

Tab. 2 The dominant interactions between different environmental factors in Shaanxi Province

年份	交互作用1	q	交互作用2	q	交互作用3	q
2005	平原∩坡向	0.727	平原∩粉砂土	0.710	林地∩人口密度	0.652
2006	林地∩人口密度	0.624	水域∩人口密度	0.583	台地∩人口密度	0.578
2007	林地∩人口密度	0.610	平原∩林地	0.602	平原∩坡度	0.598
2008	平原∩降水量	0.603	平原∩地形起伏度	0.570	平原∩林地	0.567
2009	平原∩地形起伏度	0.693	平原∩林地	0.688	平原∩坡度	0.654
2010	平原∩地形起伏度	0.797	平原∩林地	0.790	平原∩坡度	0.763
2011	平原∩坡度	0.786	平原∩地形起伏度	0.756	平原∩林地	0.738
2012	平原∩NDVI	0.531	NDVI∩砂土	0.505	平原∩降水量	0.490
2013	台地∩黏土	0.564	平原∩温度	0.547	降水量∩丘陵	0.544
2014	平原∩降水量	0.662	平原∩坡度	0.659	平原∩温度	0.620
2015	平原∩坡度	0.671	NDVI∩建设用地	0.657	平原∩温度	0.653
2016	平原∩温度	0.730	平原∩坡度	0.712	林地∩建设用地	0.710
2017	耕地∩建设用地	0.613	平原∩坡度	0.603	地形起伏度∩建设用地	0.592



注: 实心点表示具有显著性($P < 0.1$), 空心点表示不具有显著性($P > 0.1$)。

图6 关中平原HFRS疫情各因子 q 值雷达图

Fig. 6 The q value of environmental factors affecting distribution of HFRS incidences in Guanzhong Plain

表3 关中平原不同环境变量的交互作用探测

Tab. 3 The dominant interactions between different environmental factors in Guanzhong Plain

年份	交互作用1	q	交互作用2	q	交互作用3	q
2005	降水量∩建设用地	0.885	林地∩人口密度	0.826	林地∩GDP	0.818
2006	NDVI∩温度	0.906	温度∩建设用地	0.855	黏土∩建设用地	0.839
2007	降水量∩建设用地	0.837	降水量∩人口密度	0.820	降水量∩黏土	0.793
2008	降水量∩建设用地	0.910	温度∩降水量	0.862	温度∩水域	0.857
2009	降水量∩建设用地	0.874	降水量∩人口密度	0.869	降水量∩耕地	0.835
2010	林地∩人口密度	0.850	NDVI∩建设用地	0.829	降水量∩建设用地	0.823
2011	降水量∩耕地	0.877	水域∩粉砂土	0.804	降水量∩黏土	0.794
2012	降水量∩水域	0.911	降水量∩黏土	0.839	降水量∩耕地	0.810
2013	NDVI∩水域	0.754	降水量∩水域	0.700	降水量∩未利用地	0.694
2014	NDVI∩粉砂土	0.788	NDVI∩温度	0.767	降水量∩NDVI	0.764
2015	降水量∩黏土	0.872	降水量∩建设用地	0.841	温度∩降水量	0.822
2016	降水量∩砂土	0.841	降水量∩粉砂土	0.841	林地∩建设用地	0.828
2017	林地∩人口密度	0.808	降水量∩耕地	0.731	NDVI∩砂土	0.731

年,降水量分别与土壤质地、土地利用的交互作用 q 值较高,能够解释该时期约85%、74%的关中平原HFRS疫情。因此,在社会经济条件较为一致的关中平原内部,HFRS疫情空间分异主要受到降水量、NDVI、土地利用类型等要素的影响。

4 讨论

研究HFRS疫情时空分异特征及其影响要素有助于科学有效地制定或调整疫情防控策略。本研究在分析了陕西省HFRS疫情时空分异特征的基础

上,探究了陕西省及其高发病区关中平原 HFRS 疫情的主导影响要素。研究结果可为当地疫情防控提供有效建议。

陕西省 HFRS 疫情时空变化特征明显,而关中平原地区尤其值得关注。Liang 等^[12]研究表明陕西省 HFRS 疫情空间分布与其区内建筑用地面积、农田面积、人口密度、GDP 等因素有关。与前人研究结果相类似,本研究发现各县区之间的平原面积占比等自然环境以及建设用地面积占比、人口密度等社会经济条件的差异是导致陕西省 HFRS 疫情时空分异的主要原因,位于平原地区且土地城镇化水平较高、人口密度较大的县区(如宝鸡、西安、咸阳等市的高发病县区)拥有相对更高的 HFRS 发病率。同时,本研究发现土壤质地尤其是黏土也是影响陕西省 HFRS 疫情时空分异的重要因素,土壤质地主要通过影响鼠类的生存环境进而影响 HFRS 疫情^[33]。由于黏土平均土壤含水率最大^[34],土壤养分含量较高^[35],有利于农作物的生长,为鼠类提供了丰富的食物来源,进而促进了 HFRS 疫情。与此同时,本研究还发现研究期间 HFRS 疫情最严重的 2012 年,平原面积占比与降水量的交互作用能够解释 49% 的陕西省 HFRS 疫情,这与 Tian 等^[36]在西安市的研究结果相一致,同样认为降水量增多是导致 2010—2012 年 HFRS 疫情暴发的主要原因。此外,朱妮等^[9,11]研究指出,关中平原是陕西省 HFRS 疫情的高值聚集区,主要因为该地特有的降水量、农业活动等有利于黑线姬鼠的繁衍生息,这与本研究结果一致。因此,建议陕西省 HFRS 疫情防控部署资源时以关中平原为主,尤其重点关注土地城镇化水平较高、人口密度较大的县区。

进一步研究发现,关中平原内部 HFRS 疫情同样存在明显的空间异质性,其南部 HFRS 发病率高于北部。本研究结果表明各县区之间的降水量、NDVI 的差异是导致关中平原 HFRS 疫情时空分异的主要原因:关中平原南部降水量相对充沛,更有利于植被、农作物的生长,为鼠类提供了良好的生存和繁殖环境,从而增加了南部 HFRS 的传播风险^[37];此外,土地利用类型尤其是耕地、水域、建设用地也是影响关中平原 HFRS 疫情时空分异的重要因素,土地利用主要通过影响鼠类的生存环境以及人类与鼠类的接触机会进而影响 HFRS 疫情^[16,37],同时也反映了人类活动带来的土地利用变化会对 HFRS 疫情的分布传播产生影响^[16]。因此,建议关

中平原地区 HFRS 疫情防控还需结合降水量、植被状况、土地利用类型的空间分布来制定针对性措施。

本研究对陕西省 HFRS 疫情影响要素进行了相关研究,但实际上 HFRS 疫情除了受到多种自然环境和社会要素的影响外,还与其宿主动物密切相关,在后续的工作中可考虑鼠密度、鼠带毒指数、鼠种分布等要素;其次,利用地理探测器分析 HFRS 疫情的影响要素,只能揭示要素对 HFRS 疫情的影响强度大小,而难以直接获知影响要素对疫情的正负向作用,后续研究考虑结合其他方法如地理加权回归模型等进行探究。

5 结论

陕西省是我国 HFRS 疫情最严重的省份之一,发病率居全国前列,严重威胁着当地居民的健康安全。本研究利用空间自相关、热点分析探究了 2005—2017 年陕西省 HFRS 疫情的时空分异特征,并利用地理探测器探析陕西省及其高发病区关中平原 HFRS 疫情主导影响要素。具体结论如下:

(1)陕西省 HFRS 年发病率明显高于全国水平,同时呈现明显的时间波动和空间聚集;关中平原聚集了陕西省 90% 以上的高发病县区,其疫情亦呈现明显的空间分异性;

(2)陕西省 HFRS 疫情空间分异主要受到平原面积占比、坡度、黏土等自然环境要素以及建设用地面积占比、人口密度等社会经济要素的影响;而在社会经济条件较为一致的关中平原内部降水量、NDVI、土地利用类型等要素主导了 HFRS 疫情的空间分异;

(3)高发县聚集、且自然环境和社会经济条件明显不同的关中平原是陕西省 HFRS 疫情流行的关键地区,建议陕西省 HFRS 疫情防控应当重点关注降水量、植被状况以及土地利用类型,特别是在土地城镇化水平较高、人口密度较大的关中平原进行有效的防控干预。

参考文献(References):

- [1] Clement J, Maes P, Lagrou K, et al. A unifying hypothesis and a single name for a complex globally emerging infection: Hantavirus disease[J]. *European Journal of Clinical Microbiology & Infectious Diseases*, 2012,31(1):1-5.
- [2] Jonsson C B, Figueiredo L T M, Vapalahti O. A global perspective on hantavirus ecology, epidemiology, and dis-

- ease[J]. *Clinical Microbiology Reviews*, 2010,23(2):412-441.
- [3] Kariwa H, Yoshimatsu K, Arikawa J. Hantavirus infection in East Asia[J]. *Comparative Immunology, Microbiology and Infectious Diseases*, 2007,30(5-6):341-356.
- [4] Zhang Y Z, Zou Y, Fu Z F, et al. Hantavirus infections in humans and animals, China[J]. *Emerging Infectious Diseases*, 2010,16(8):1195-1203.
- [5] Li S J, Ren H Y, Hu W S, et al. Spatiotemporal heterogeneity analysis of hemorrhagic fever with renal syndrome in China using geographically weighted regression models [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2014,11(12):12129-12147.
- [6] 黄立勇.中国肾综合征出血热流行特征及周期性研究[D].北京:中国疾病预防控制中心,2012. [Huang L Y. Epidemiological characteristics and periodicity of hemorrhagic fever with renal syndrome in China[D]. Beijing: Chinese Center for Disease Control and Prevention, 2012.]
- [7] 刘晓冬.中国肾综合征出血热时空分布及气候因素对辽宁省 HFRS 影响的研究[D].济南:山东大学,2012. [Liu X D. A study on the spatial and temporal distribution of HFRS in China and the impact of climate factors on HFRS in Liaoning Province[D]. Ji'nan: Shandong University, 2012.]
- [8] Xiao H, Liu H N, Gao L D, et al. Investigating the effects of food available and climatic variables on the animal host density of hemorrhagic fever with renal syndrome in Changsha, China[J]. *PLoS ONE*, 2013,8(4):e61536.
- [9] Tian H Y, Yu P B, Bjørnstad O N, et al. Anthropogenically driven environmental changes shift the ecological dynamics of hemorrhagic fever with renal syndrome[J]. *PLoS Pathogens*, 2017,13(1):e1006198.
- [10] 陈化新,罗成旺,陈富,等.中国肾综合征出血热监测研究[J].*中国公共卫生*,1999,15(7):616-623. [Chen H X, Luo C W, Chen F, et al. Study and surveillance of HFRS (Hemorrhage Fever with Renal Syndrome) in China[J]. *Chinese Journal of Public Health*, 1999,15(7):616-623.]
- [11] 朱妮,刘峰,邱琳,等. 2011-2015 年陕西省肾综合征出血热时空聚集性分析[J].*现代预防科学*,2017,44(9):1537-1540,1552. [Zhu N, Liu F, Qiu L, et al. Temporal-spatial clustering of hemorrhagic fever with renal syndrome in Shaanxi Province, 2011- 2015[J]. *Modern Preventive Medicine*, 2017,44(9):1537-1540,1552.]
- [12] Liang W F, Gu X, Li X, et al. Mapping the epidemic changes and risks of hemorrhagic fever with renal syndrome in Shaanxi Province, China, 2005-2016[J]. *Scientific Reports*, 2018,8(1):749.
- [13] Guan P, Huang D S, He M, et al. Investigating the effects of climatic variables and reservoir on the incidence of hemorrhagic fever with renal syndrome in Huludao City, China: A 17-year data analysis based on structure equation model[J]. *BMC Infectious Diseases*, 2009,9:109.
- [14] Zhang W Y, Guo W D, Fang L Q, et al. Climate variability and hemorrhagic fever with renal syndrome transmission in Northeastern China[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2010,118(7):915-920.
- [15] 闫磊,黄华国,张文义,等.肾综合征出血热疫情与 NDVI 的时间关系——以内蒙古自治区大杨树镇为例[J].*遥感学报*,2009,13(5):873-886. [Yan L, Huang H G, Zhang W Y, et al. The relationship between hemorrhagic fever with renal syndrome cases and time series of NDVI in Dayangshu District[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009,13(5):873-886.]
- [16] 肖洪,林晓玲,高立冬,等.湘江中下游肾综合征出血热传播风险预测和环境危险因素分析[J].*地理科学*,2013,33(1):123-128. [Xiao H, Lin X L, Gao L D, et al. Environmental factors contributing to the spread of hemorrhagic fever with renal syndrome and potential risk areas prediction in midstream and downstream of the Xiangjiang River[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2013,33(1):123-128.]
- [17] Yan L, Fang L Q, Huang H G, et al. Landscape elements and hantaan virus-related hemorrhagic fever with renal syndrome, People's Republic of China[J]. *Emerging Infectious Diseases*, 2007,13(9):1301-1306.
- [18] Xiao H, Tian H Y, Gao L D, et al. Animal reservoir, natural and socioeconomic variations and the transmission of hemorrhagic fever with renal syndrome in Chenzhou, China, 2006- 2010[J]. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, 2014,8(1):e2615.
- [19] 张清敏,禹长兰,赵晓蒙,等. 2000—2015 年安丘市肾综合征出血热流行特征和趋势分析[J].*预防医学论坛*,2016,22(5):388-391. [Zhang Q M, Yu C L, Zhao X M, et al. Epidemiological characteristics and trend of hemorrhagic fever with renal syndrome, Anqiu city, 2005-2015[J]. *Preventive Medicine Tribune*, 2016,22(5):388-391.]
- [20] 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.]
- [21] 通拉嘎,徐新良,付颖,等.地理环境因子对螺情影响的探测分析[J].*地理科学进展*,2014,33(5):625-635. [Tong L G, Xu X L, Fu Y, et al. Impact of environmental factors on snail distribution using geographical detector model [J]. *Progress in Geography*, 2014,33(5):625-635.]
- [22] 张湘雪,王丽,尹礼唱,等.京津唐地区 HFMD 时空变异分

- 析与影响因子探测[J].地球信息科学学报,2019,21(3):398-406. [Zhang X X, Wang L, Yin L C, et al. Spatial-temporal variation analysis and risk determinants of hand, foot and mouth disease in Beijing- Tianjin- Tangshan, China[J]. Journal of Geo-information Science, 2019, 21(3):398-406.]
- [23] 陕西省统计局.陕西统计年鉴2018[M].北京:中国统计出版社,2018. [Statistical Bureau of Shaanxi Province. Shaanxi statistical yearbook 2018[M]. Beijing: China Statistical Press, 2018.]
- [24] 中国气象数据网[EB/OL].(<http://data.cma.cn>). [China meteorological data service centre[EB/OL]. (<http://data.cma.cn>).]
- [25] 资源环境数据云平台[EB/OL].(<http://www.resdc.cn>). [Resource and environment data cloud platform[EB/OL]. (<http://www.resdc.cn>).]
- [26] 封志明,唐焰,杨艳昭,等.中国地形起伏度及其与人口分布的相关性[J].地理学报,2007,62(10):1073-1082. [Feng Z M, Tang Y, Yang Y Z, et al. The relief degree of land surface in China and its correlation with population distribution[J]. Acta Geographica Sinica, 2007,62(10):1073-1082.]
- [27] Moran P A P. The interpretation of statistical maps[J]. Journal of the Royal Statistical Society Series B (Statistical Methodology), 1948,10(2):243-251.
- [28] Getis A, Ord J K. The analysis of spatial association by use of distance statistics[J]. Geographical Analysis, 1992, 24(3):189-206.
- [29] Ord J K, Getis A. Local spatial autocorrelation statistics: Distributional issues and an application[J]. Geographical Analysis, 1995,27(4):286-306.
- [30] 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.
- [31] 阎世杰,王欢,焦珂伟.京津冀地区植被时空动态及定量归因[J].地球信息科学学报,2019,21(5):767-780. [Yan S J, Wang H, Jiao K W. Spatiotemporal dynamic of NDVI in the Beijing-Tianjin-Hebei region based on MODIS data and quantitative attribution[J]. Journal of Geo-information Science, 2019,21(5):767-780.]
- [32] 刘彦随,李进涛.中国县域农村贫困化分异机制的地理探测与优化决策[J].地理学报,2017,72(1):161-173. [Liu Y S, Li J T. Geographic detection and optimizing decision of the differentiation mechanism of rural poverty in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(1):161-173.]
- [33] 许勤勤.山东省肾综合征出血热流行特征及其区域风险预测[D].济南:山东大学,2018. [Xu Q Q. Epidemiological characteristics and regional risk prediction of hemorrhagic fever with renal syndrome in Shandong Province [D]. Ji'nan: Shandong University,2018.]
- [34] 高燕虎,吴春燕.北京地区3种典型质地土壤水分变化规律[J].安徽农业科学,2012,40(4):2034-2036. [Gao Y H, Wu C Y. Soil moisture variation of three typical soil textures in Beijing area[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012,40(4):2034-2036.]
- [35] 余学祥,吴锦松.安庆市耕地土壤质地概况及其对土壤肥力的影响[J].安徽农学通报,2006,12(12):111-113. [Yu X X, Wu J S. A survey of soil texture of cultivated land and its influence on soil fertility in Anqing Cit[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin (in Chinese), 2006,12(12):111-113.]
- [36] Tian H Y, Yu P B, Luis A D, et al. Changes in rodent abundance and weather conditions potentially drive hemorrhagic fever with renal syndrome outbreaks in Xi'an, China, 2005- 2012[J]. PLoS Neglected Tropical Diseases, 2015,9(3):e0003530.
- [37] 李雪.渭河流域肾综合征出血热时空特征及环境影响因素研究[D].西安:第四军医大学,2018. [Li X. Epidemiological characteristics and environmental risk factors of Hemorrhagic fever with renal syndrome in Wei River basin, China[D]. Xi'an: Fourth Military Medical University, 2018.]