

·综述·

空间流行病学应用于艾滋病预防控制的研究进展

马凯芳 张晓婷 李东民

中国疾病预防控制中心性病艾滋病预防控制中心流行病学室, 北京 102206

通信作者: 李东民, Email: lidongmin@chinaaids.cn

【摘要】 空间流行病学利用地理信息系统和空间分析技术研究疾病的空间分布特点及发展变化规律, 探索影响特定人群健康状况因素, 近年来逐渐应用于艾滋病防控领域。本文对其应用于艾滋病时空分布模式分析、非监测点地区数据推算、流行影响因素探索、卫生资源分配利用等方面的研究进行综述, 为未来空间流行病学在我国艾滋病防控中的应用提供参考。

【关键词】 艾滋病病毒/艾滋病; 空间流行病学; 地理信息系统; 空间分析

基金项目: 国家科技重大专项 (2017ZX10201101-002-006)

Progress on application of spatial epidemiology in HIV/AIDS control and prevention

Ma Kaifang, Zhang Xiaoting, Li Dongmin

Division of Epidemiology, National Center for AIDS/STD Control and Prevention, Chinese Center for Disease Control and Prevention, Beijing 102206, China

Corresponding author: Li Dongmin, Email: lidongmin@chinaaids.cn

【Abstract】 Spatial epidemiology focuses on the use of geographic information systems and spatial analysis to study spatial distribution and change tendency of diseases and explore the health status of specific populations. In recent years, spatial epidemiology has been applied in the field of HIV/AIDS prevention and control. This review summarizes the progress in the application of spatial epidemiology in the analysis of spatiotemporal distribution, non-monitoring area data estimation, influencing factors of AIDS and health resource allocation and utilization to provide reference for its application in the prevention and control of AIDS in the future.

【Key words】 HIV/AIDS; Spatial epidemiology; Geographical information system; Spatial analysis

Fund program: National Science and Technology Major Project of China (2017ZX10201101-002-006)

空间流行病学作为一门分析疾病空间分布特点和变化规律、探索特定区域人群疾病影响因素、为防治疾病提供策略和措施的科学在传染病研究中发挥着重要作用^[1]。艾滋病具有地方高发性特点^[2], HIV 感染及发病与各地区经济、文化、人口密度及流动性、医疗卫生及行为生活方式等因素密切相关^[3]; 同时随着地理信息系统 (geographical information system, GIS) 和空间分析技术的快速发展, 环境和社会经济文化等大数据更易获取, 艾滋病监测和调查数据蕴含空间信息的准确性进一步提高, 空间流行病学在艾滋病防控中得到了广泛应用^[4-5]。本文对目前空间流行病

学应用于艾滋病预防控制的研究进展进行综述, 为其在该领域的进一步应用提供参考。

一、分析艾滋病时空分布模式

艾滋病病例报告、哨点监测、专题流行病学调查等数据多以行政区划或监测点位置的空间形式呈现, GIS 创建功能将其与地图信息匹配形成专题地图可直观展示 HIV 流行水平较高的地区, 相关统计推断方法分析艾滋病空间流行特点和时空动态变化能揭示其流行过程中隐含的空间信息。

1. 探索艾滋病空间分布特征: 空间分布特征指全局及局域尺度空间相关性, 前者常由全局 Moran's *I* 值或高/低聚

DOI: 10.3760/cma.j.cn112338-20210816-00645

收稿日期 2021-08-16 本文编辑 斗智

引用格式: 马凯芳, 张晓婷, 李东民. 空间流行病学应用于艾滋病预防控制的研究进展[J]. 中华流行病学杂志, 2022, 43(1): 128-133. DOI: 10.3760/cma.j.cn112338-20210816-00645.

Ma KF, Zhang XT, Li DM. Progress on application of spatial epidemiology in HIV/AIDS control and prevention[J]. Chin J Epidemiol, 2022, 43(1): 128-133. DOI: 10.3760/cma.j.cn112338-20210816-00645.



类度量艾滋病在整个研究区域内是否存在聚集性^[6-7];后者由局部 Moran's I 值或热点分析 (Getis ord G^*) 判断某空间单元与邻近空间单元内艾滋病分布相关性进而确定聚集区域^[8-10]。相关研究可于全国或部分省、市、县(区)或更小单元开展, Cuadros 等^[11]发现 2015 年津巴布韦 HIV 感染率较高地区聚集于西南部, 且女性较男性分散, 郝尹斌等^[12]以 2004–2015 年中国重庆市报告的男男性行为人群 (MSM) HIV 感染者为研究对象, 发现其聚集位置为主城区且聚集性较强。此外, 对比不同时间段的横断面空间制图可了解聚集区的纵向变化, 如陈方方等^[13]分析发现 2010–2016 年新报告 ≥ 15 岁女性 HIV 感染者主要分布于我国西部和南部地区, 其中育龄期女性聚集区向西部边境、南部沿海地区流动, ≥ 50 岁者呈由西南向北扩散的特点; 张克春等^[14]发现中国广东省 2007–2017 年新报告 HIV 感染者主要聚集于珠江三角洲地区且覆盖范围逐年扩大, 阳江市等个别城市聚集性逐渐下降。

2. 分析艾滋病时空变化趋势: 基于 Kulldorff 空间扫描统计量, SaTScan 软件以动态变化的圆柱形窗口从时间、空间、时空多维度探测聚集区, 并通过对数似然比和相对危险度量化窗口内艾滋病异常程度及窗口内外发病危险比值, 其样本多为连续数值型资料^[15-17]。Qin 等^[18]使用该方法探索发现 2006–2015 年我国报告 MSM 的 HIV 感染者聚集时间为近 5 年, 大、中城市作为其聚集群呈由东向中西部地区扩散趋势; 蔡畅等^[19]发现 1988–2014 年报告外籍病例聚集于我国中、东部地区, 覆盖范围逐年缩小并向东南沿海地区偏移; Ying 等^[20]探索埃塞俄比亚 2005、2011、2016 年人口与健康调查数据发现新报告 15–49 岁 HIV 感染者的聚集区数量由 7 个减少至 5 个, 其中 4 个为持续聚集区。

贝叶斯层次模型考虑时空现象中存在小样本及空间自相关性等问题, 引入先验信息, 将所有未知参数视为随机变量, 借助 WinBUGS 软件定量估计时空过程中的总体空间分布格局、总体变化趋势和各统计单元的局部变化, 由迭代历史轨迹和自相关系数判断模型的可靠性, 通过后验概率和局部变化参数判断局部区域与全国总体水平、局部变化趋势与全国总体趋势的关系, 其样本可为离散计数资料或连续数值型资料^[21-23]。Ramjee 等^[24]根据 2002–2012 年于南非德班市开展的 7 557 名育龄期女性 HIV 新发感染队列研究结果建立社区水平的贝叶斯层次模型, 确定了 6 个 HIV 新发感染率高值社区; Otiende 等^[25]对肯尼亚 2012–2017 年艾滋病及结核病病例报告数据分别构建该模型, 发现两类病例聚集区相似, 其合并感染风险呈增加趋势。

3. 探索艾滋病空间格局演变: 艾滋病空间分布的方向趋势通过趋势分析方法绘制 X (经度)、 Y (纬度)、 Z (属性值) 轴的三维透视图, 将带属性值的散点投影至 XZ 和 YZ 平面进行多项式曲线拟合而实现^[26]。彭志行等^[27]通过该方法发现中国江苏省各县(区)新报告 HIV 感染者占人口数比例在东、西方向较为平稳, 而由北向南呈现先降低再上升的趋势。

标准差椭圆可同时分析点的方向和分布, 其输出椭圆的长、短半轴分别表示数据分布方向和范围, 扁率越大即两半轴长短差异越大, 其方向性越明显^[28]。覃雄林等^[29]发现广西壮族自治区贵港市 2007–2017 年各县(区)累计报告 HIV 感染者数与暗娼哨点监测中 HIV 抗体阳性人数的标准差椭圆面积和扁率大小一致, 其方向与交通主干道相符。

艾滋病时空轨迹迁移可通过重心/中位点移动轨迹显示, 以研究区域的经/纬度坐标为基础、以艾滋病数据为权重计算得到重心/中位点, 连接相邻时间截面的点即可形成, 其中前者对极端值敏感而后者较为稳健^[30-31]。区域的选择和划分可根据研究目的调整, 张永树等^[32]发现 1997–2016 年我国各省份报告 HIV 感染者占当地人口数比例呈空间非均衡增长态势, 重心主要集中于湖南省、湖北省和重庆市, 并呈由南向北移动的特征; 邢健男等^[33]将 2005–2011 年注射吸毒 HIV 感染者聚集位置划分为西北、西南两个地区, 并计算各区域中位点, 发现前者局限于新疆维吾尔自治区等个别高发区域, 而后者呈由南至北、由边境地区向内陆地区转移的特点。

二、推算非监测点地区艾滋病数据

空间流行病学也常采用抽样研究, 插值是利用有限样本信息分布规律对未抽样点或非监测地区点值进行估计以提高数据完整性的常用方法, 已知点的数据越多、分布越广, 插值结果越接近实际情况^[34]。空间自相关性强的数据可选择核密度函数、趋势面插值法和 Kriging 插值法, 前两者在样本点少时受极端值影响误差较大, Kriging 插值法结果在二阶平稳条件下无偏最优^[35-36]。如 Palk 和 Blower^[37]采用趋势面插值法对 2010 年马拉维人口与健康调查数据以性别分层构建 HIV 感染率及多性伴人群规模地图; Schaefer 等^[38]利用 Kriging 插值法绘制 2012–2013 年津巴布韦马尼卡兰省 110 个地区一般人群 HIV 感染率和相关服务接受率插值图。空间分层异质性强的数据宜选择三明治模型^[35-36], 秦倩倩^[39]根据 2015 年我国 101 个城市 MSM 哨点监测数据推算全国各城市 MSM 的 HIV 感染率 $\geq 5.0\%$ 的比例为 48.8%, 部分城市 HIV 感染率与流行病学调查结果近似。

利用 GIS 在纵向时间上预测 HIV 流行情况的研究相对较少, Shand 等^[40]提出了一类空间变异自回归效应模型, 并搜集 2008–2014 年美国佛罗里达州、加利福尼亚州和新英格兰地区诊断发现的 HIV 感染者数据和协变量信息预测 2015 年新诊断数, 发现该模型拟合效果优于其他线性混合模型。

三、探索艾滋病流行影响因素

地理探测器是度量因变量(y)与自变量(x)空间分布格局一致性即变量间关联性的工具, 可明确 x 之间的相对重要性并探测其交互作用, 适用于 x 为分类、 y 为数值型的资料, 由取值范围为 $[0, 1]$ 的 q 值度量关联强度, 由皮尔森相关系数或非参数检验判断关联方向^[41]。刘萌萌等^[42]探索发现 2005、2010、2015 年全国报告 HIV 感染者的空间分层异质性是文化程度、医疗卫生状况及居民收入等多因素共同作用

的结果,且任意两因素交互作用均会增加对艾滋病空间分布的解释力。

地理加权回归 (geographically weighted regression, GWR) 进一步纳入数据空间属性,利用移动窗口加权技术建立局部模型描述各因素作用随空间变化的非平稳性,可弥补地理探测器仅从全局区域探索影响 HIV 流行因素的不足^[43]。同时利用半参数 GWR 中 DIFF 统计量对 x 系数的局部变化作统计检验,通过拟合优度 R^2 、条件数、信息准则等参数判断模型拟合效果^[44-45]。Arbona 和 Barro^[46] 建立 2011-2015 年美国得克萨斯州各县报告 HIV 感染者晚发现比例与人口普查数据中贫困、失业率、至 HIV 检测点距离、医疗保险参加比例等变量的多尺度 GWR,发现各县 (区) 不同 x 与 y 的关联方向及强度均存在差异;Muleia 等^[47] 分析 2009 年莫桑比克艾滋病指标调查中 15~24 岁青少年 HIV 感染率数据,发现年轻女性占比、文化程度影响中部及东北部居民 HIV 感染水平。

有的研究者还尝试探索艾滋病流行影响因素的新方法^[48],如张亚慧等^[49]、孙舒曼等^[50] 融合 GWR 和泊松模型探究我国各省经济、交通、卫生水平及人口密度等因素与 HIV 感染者报告数的关系;Wand 等^[51] 搜集 2002-2012 年南非的计划生育门诊、社区等招募场所 5 776 名女性居住地址的经、纬度,利用广义相加模型分析年龄、性别、至医院距离等因素与各地 HIV 感染率的关系。

四、探寻艾滋病卫生资源分配利用情况

卫生机构常设置在服务附近目标人群的区域,但其实际利用程度往往存在差异,通过空间流行病学了解不同特征人群利用卫生资源真实情况有利于优化资源配置^[52]。

Yao 和 Agadjanian^[53] 基于空间分析探讨莫桑比克 4 个毗连地区中农村育龄期女性产前保健服务利用情况,发现寻求距离较远的服务与其年龄、HIV 感染情况、经济状况及服务需求有关;Weiss 等^[54] 收集 2005-2015 年主动前往泰国曼谷 Silom 社区诊所寻求咨询和检测服务的 MSM 和跨性别者信息,发现其居住地离 HIV 检测机构的距离 < 2 km 的比例增加,检测服务的可及性增强。考虑到多数研究通过两点之间直线距离作为卫生服务可及性指标的代表性不佳,Palk 等^[55] 借助 AccessMod 软件计算各交通方式在不同土地覆盖、道路类型、地形坡度环境下的速度,结合 2015 年马拉维人口与健康调查中 HIV 感染者住所距最近医疗机构的实际距离计算时间,建立地理模型分析发现病例到达卫生保健机构耗时长、农村地区缺乏交通工具是实现抗病毒治疗高水平覆盖的主要障碍,提出增加农村地区自行车可获得性的建议。

五、结论

我国自 2003 年起建立全国艾滋病综合防治示范区,相关专家即提出利用 GIS 直观描述艾滋病发现及死亡数据^[56];随着病例报告系统、哨点监测及专题流行病学调查数据日趋庞大,空间流行病学相关方法日渐成熟且多样,为艾滋病监测数据的利用提供了新的分析思路 and 实现途径,在

探索 HIV 流行形势、时空变化特点以及宏观和微观的影响因素等方面发挥了重要作用,为我国实施因地制宜的防控策略提供更多参考依据。全球定位系统、遥感技术、空间分析技术的发展,使之在疾病分析中应用更为广泛^[57]。但同时数据利用、方法应用、结果解读等方面也存在一定不足,需进一步完善,以满足 HIV 流行形势研判和防治工作需求。

1. 应加强空间属性信息的收集,提高数据质量与可利用性:良好的数据质量是获得准确结果的重要前提,尤其当统计单元基于县 (区)、街道时,更需培训工作人员规范采集及处理数据的能力,需要确保收集的地理编码、社会人口学及行为学信息与真实情况相符;专题调查能收集针对性强、与病因直接关联的信息,但目前其空间属性数据较为粗糙或缺乏,深入的空间分析难以实现,对此,研究人员在设计调查问卷时可考虑增设“地址编码/坐标”等问题。

2. 根据研究目的选择恰当的空间分析技术:不同空间分析技术的运用也有自身特点,如空间自相关方法擅长识别高 HIV 流行水平聚集区的位置,SaTScan 软件能敏锐地捕捉目前处于低流行水平但病例增长速度快的区域,贝叶斯层次模型可估计某地疫情变化趋势与全国总体疫情趋势的关系;空间插值技术将地理位置属性纳入模型进行推算,弥补了非监测点地区数据的空白,但基于统计单元的经济、文化、环境、人口及个体行为特征等影响因素难以全面准确地获取,导致推算值与真实值存在一定偏差;同时,HIV 流行影响因素的探索也面临相同问题,提示需进一步加强多来源数据库链接及其与社会宏观因素的整合,尝试将个体行为特征提升至面数据的可能性^[58];获得相关数据利用标准差椭圆等方法探寻 HIV 感染者的空间分布、行为特征与地区要素 (如交通路线、酒吧等活动场所) 的空间格局,也有助于运用地理探测器^[59]、GWR 等方法分析艾滋病与行为、社会文化等因素的关系。

3. 基于疾病生物学特征,对分析结果进行科学解读:我国艾滋病分布呈空间异质性和聚集性,因此基于省、市、县 (区)、街道、社区等不同报告单元分析的疫情时空分布特征、变化趋势、影响流行的因素大小也有所差异,随着精准化防控策略的提出,基于更小单元探索成为热潮,但其数据解读也更具挑战。科学解读结果是提供决策者有效信息的前提,该过程要求研究人员紧密结合当地 HIV 流行特点,同时经多种方法互相印证、必要时寻找合适的变量对其矫正、正确评估偏倚大小和方向。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

参 考 文 献

- [1] 周晓农,杨国静,杨坤,等.中国空间流行病学的发展历程与发展趋势[J].中华流行病学杂志,2011,32(9):854-858. DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2011.09.002. Zhou XN, Yang GJ, Yang K, et al. Progress and trends of spatial epidemiology in China[J]. Chin J Epidemiol, 2011, 32(9):854-858. DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2011.09.002.

- [2] 王丽艳, 秦倩倩, 丁正伟, 等. 中国艾滋病全国疫情数据分析[J]. 中国艾滋病性病, 2017, 23(4): 330-333. DOI: 10.13419/j.cnki.aids.2017.04.16.
- Wang LY, Qin QQ, Ding ZW, et al. Current situation of AIDS epidemic in China[J]. Chin J AIDS STD, 2017, 23(4): 330-333. DOI:10.13419/j.cnki.aids.2017.04.16.
- [3] 丁书珍, 张辉国, 胡锡健, 等. 利用 R-INLA 方法分析宏观因素对艾滋病疫情的影响[J]. 中国艾滋病性病, 2018, 24(12): 1192-1196. DOI:10.13419/j.cnki.aids.2018.12.04.
- Ding SZ, Zhang HG, Hu XJ, et al. Influence of macroscopic factors on HIV/AIDS epidemic based on R-INLA method[J]. Chin J AIDS STD, 2018, 24(12): 1192-1196. DOI: 10.13419/j.cnki.aids.2018.12.04.
- [4] 刘昆, 李新楼, 邵中军. 空间流行病学在疾病预防控制工作中发挥着重要作用[J]. 中华流行病学杂志, 2018, 39(9): 1143-1145. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2018.09.001.
- Liu K, Li XL, Shao ZJ. Spatial epidemiology plays an important role in control and prevention of diseases[J]. Chin J Epidemiol, 2018, 39(9): 1143-1145. DOI: 10.3760/cma.jissn.0254-6450.2018.09.001.
- [5] Kirby RS, Delmelle E, Eberth JM. Advances in spatial epidemiology and geographic information systems[J]. Ann Epidemiol, 2017, 27(1): 1-9. DOI:10.1016/j.annepidem.2016.12.001.
- [6] ESRI-ArcGIS. 高/低聚类(Getis-Ord General G)的工作原理[EB/OL]. (2020-01-01)[2021-05-18]. <https://desktop.arcgis.com/zh-cn/arcmap/latest/tools/spatial-statistics-toolbox/h-how-high-low-clustering-getis-ord-general-g-spat.htm>.
- ESRI-ArcGIS. Working principle of Getis-Ord General G [EB/OL]. (2020-01-01)[2021-05-18]. <https://desktop.arcgis.com/zh-cn/arcmap/latest/tools/spatial-statistics-toolbox/h-how-high-low-clustering-getis-ord-general-g-spat.htm>.
- [7] ESRI-ArcGIS. 空间自相关(Global Moran's I)的工作原理[EB/OL]. (2020-01-01) [2021-05-18]. <https://desktop.arcgis.com/zh-cn/arcmap/latest/tools/spatial-statistics-toolbox/h-how-spatial-autocorrelation-moran-s-i-spatial-st.htm>.
- ESRI-ArcGIS. Working principle of Global Moran's I [EB/OL]. (2020-01-01) [2021-05-18]. <https://desktop.arcgis.com/zh-cn/arcmap/latest/tools/spatial-statistics-toolbox/h-how-spatial-autocorrelation-moran-s-i-spatial-st.htm>.
- [8] ESRI-ArcGIS. 热点分析(Getis-Ord Gi*)的工作原理[EB/OL]. (2020-01-01) [2021-05-18]. <https://desktop.arcgis.com/zh-cn/arcmap/latest/tools/spatial-statistics-toolbox/h-how-hot-spot-analysis-getis-ord-gi-spatial-stati.htm>.
- ESRI-ArcGIS. Working principle of Getis-Ord Gi* [EB/OL]. (2020-01-01) [2021-05-18]. <https://desktop.arcgis.com/zh-cn/arcmap/latest/tools/spatial-statistics-toolbox/h-how-hot-spot-analysis-getis-ord-gi-spatial-stati.htm>.
- [9] ESRI-ArcGIS. 聚类分析和异常值分析(Anselin Local Moran's I)的工作原理[EB/OL]. (2020-01-01)[2021-05-18]. <https://desktop.arcgis.com/zh-cn/arcmap/latest/tools/spatial-statistics-toolbox/h-how-cluster-and-outlier-analysis-anselin-local-m.htm>.
- ESRI-ArcGIS. Working principle of Anselin Local Moran's I [EB/OL]. (2020-01-01) [2021-05-18]. <https://desktop.arcgis.com/zh-cn/arcmap/latest/tools/spatial-statistics-toolbox/h-how-cluster-and-outlier-analysis-anselin-local-m.htm>.
- [10] 左佳鹭, 袁黄波, 岳清, 等. 2005-2015 年上海市常住人口及外来人口 HIV 感染者和艾滋病患者时空分布特征分析[J]. 中华预防医学杂志, 2018, 52(12): 1264-1268. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0253-9624.2018.12.014.
- Zuo JL, Yuan HB, Yue Q, et al. Spatial-temporal analysis on the Human Immunodeficiency Virus/Acquired Immunodeficiency Syndrome among permanent residence and migrants in Shanghai, 2005-2015[J]. Chin J Prev Med, 2018, 52(12): 1264-1268. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0253-9624.2018.12.014.
- [11] Cuadros DF, Li JJ, Mukandavire Z, et al. Towards UNAIDS Fast-Track goals: targeting priority geographic areas for HIV prevention and care in Zimbabwe[J]. Aids, 2019, 33(2): 305-314. DOI:10.1097/qad.0000000000002052.
- [12] 郝尹斌, 秦倩倩, 吴国辉, 等. 2004-2015 年重庆市经男男性行为感染 HIV 者空间聚集性及行为分析[J]. 中华预防医学杂志, 2017, 51(5): 432-437. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0253-9624.2017.05.012.
- Hao YX, Qin QQ, Wu GH, et al. Analysis of spatial clustering of HIV infected in men who have sex with men in Chongqing of 2004-2015[J]. Chin J Prev Med, 2017, 51(5): 432-437. DOI:10.3760/cma.j.issn.0253-9624.2017.05.012.
- [13] 陈方方, 郭巍, 秦倩倩, 等. 我国 2010-2016 年新发现 15 岁及以上女性艾滋病病毒感染者及艾滋病患者的时空分布特征[J]. 中华流行病学杂志, 2018, 39(6): 739-744. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2018.06.009.
- Chen FF, Guo W, Qin QQ, et al. Spatial-temporal distribution of newly detected HIV/AIDS cases among aged 15 years or older women in China, 2010-2016[J]. Chin J Epidemiol, 2018, 39(6): 739-744. DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2018.06.009.
- [14] 张克春, 付笑冰, 刘珺, 等. 2007-2017 年广东省 HIV/AIDS 流行时空分布特征[J]. 中华疾病控制杂志, 2018, 22(12): 1211-1215. DOI:10.16462/j.cnki.zhjbkz.2018.12.003.
- Zhang KC, Fu XB, Liu J, et al. Spatiotemporal characteristics of HIV/AIDS in Guangdong province, 2007-2017[J]. Chin J Dis Control Prev, 2018, 22(12): 1211-1215. DOI:10.16462/j.cnki.zhjbkz.2018.12.003.
- [15] 高梦婷, 王棠, 王科坤, 等. 湖北省 2010-2013 年艾滋病时空分布特征分析[J]. 中华流行病学杂志, 2017, 38(3): 354-358. DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2017.03.016.
- Gao MT, Wang T, Wang KK, et al. Spatial and temporal characteristics of HIV/AIDS in Hubei province, 2010-2013[J]. Chin J Epidemiol, 2017, 38(3): 354-358. DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2017.03.016.
- [16] Li ML, Li RJ, Shen ZY, et al. Spatial distribution of HIV, HCV, and co-infections among drug users in the southwestern border areas of China (2004-2014): a cohort study of a national methadone maintenance treatment program[J]. BMC Public Health, 2017, 17(1): 759. DOI: 10.1186/s12889-017-4769-7.
- [17] 李秀央, 陈坤. 扫描统计量的理论及其在空间流行病学中的应用[J]. 中华流行病学杂志, 2008, 29(8): 828-831.
- Li XY, Chen K. Scan statistic theory and its application in spatial epidemiology[J]. Chin J Epidemiol, 2008, 29(8): 828-831.
- [18] Qin QQ, Guo W, Tang WM, et al. Spatial analysis of the Human Immunodeficiency Virus epidemic among men who have sex with men in China, 2006-2015[J]. Clin Infect Dis, 2017, 64(7): 956-963. DOI:10.1093/cid/cix031.
- [19] 蔡畅, 王丽艳, 郭巍, 等. 我国外籍 HIV/AIDS 病例的时空特征分析[J]. 中国艾滋病性病, 2015, 21(9): 757-761. DOI: 10.13419/j.cnki.aids.2015.09.04.
- Cai C, Wang LY, Guo W, et al. The description of time-spatial distribution of the foreigners with HIV/AIDS in China[J]. Chin J AIDS STD, 2015, 21(9): 757-761. DOI: 10.13419/j.cnki.aids.2015.09.04.

- [20] Ying R, Fekadu L, Schackman BR, et al. Spatial distribution and characteristics of HIV clusters in Ethiopia[J]. *Trop Med Int Health*, 2020, 25(3): 301-307. DOI: 10.1111/tmi.13356.
- [21] Oseni Z, Seedat F, Kandala NB. HIV epidemic heterogeneity in Zimbabwe: evidence from successive demographic and health surveys[J]. *J Biosoc Sci*, 2018, 50(6):840-852. DOI:10.1017/s0021932017000657.
- [22] Teixeira R, Rodrigues MGA, Ferreira MD, et al. Tuberculosis and malaria walk side by side in the Brazilian Amazon: an ecological approach[J]. *Trop Med Int Health*, 2019, 24(8):1003-1010. DOI:10.1111/tmi.13282.
- [23] Xiao CH, Jike C, Liu DP, et al. The changing modes of Human Immunodeficiency Virus transmission and spatial variations among women in a minority prefecture in southwest China: An exploratory study[J]. *Medicine (Baltimore)*, 2020, 99(6): e18776. DOI: 10.1097/md.00000000000018776.
- [24] Ramjee G, Sartorius B, Morris N, et al. A decade of sustained geographic spread of HIV infections among women in Durban, South Africa[J]. *BMC Infect Dis*, 2019, 19(1):500. DOI:10.1186/s12879-019-4080-6.
- [25] Otiende VA, Achia TN, Mwambi HG. Bayesian hierarchical modeling of joint spatiotemporal risk patterns for Human Immunodeficiency Virus (HIV) and Tuberculosis (TB) in Kenya[J]. *PLoS One*, 2020, 15(7):e0234456. DOI:10.1371/journal.pone.0234456.
- [26] ESRI-ArcGIS. 趋势分析[EB/OL]. (2020-01-01) [2021-05-18]. <https://desktop.arcgis.com/zh-cn/arcmap/latest/extensions/geostatistical-analyst/trend-analysis.htm>. ESRI-ArcGIS. Trend analysis[EB/OL]. (2020-01-01) [2021-05-18]. <https://desktop.arcgis.com/zh-cn/arcmap/latest/extensions/geostatistical-analyst/trend-analysis.htm>.
- [27] 彭志行, 羊海涛, 成月佳, 等. 应用地理信息系统技术对江苏省艾滋病疫情的空间分析[J]. *中华流行病学杂志*, 2011, 32(1): 42-46. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2011.01.011.
Peng ZH, Yang HT, Cheng YJ, et al. Study on the spatial distribution of AIDS based on geographic information system in Jiangsu province[J]. *Chin J Epidemiol*, 2011, 32(1): 42-46. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2011.01.011.
- [28] ESRI-ArcGIS. 方向分布(标准差椭圆)的工作原理[EB/OL]. (2020-01-01) [2021-05-18]. <https://desktop.arcgis.com/zh-cn/arcmap/10.3/tools/spatial-statistics-toolbox/h-how-directional-distribution-standard-deviation.htm>. ESRI-ArcGIS. Working principle of direction distribution (standard deviation ellipse)[EB/OL]. (2020-01-01) [2021-05-18]. <https://desktop.arcgis.com/zh-cn/arcmap/10.3/tools/spatial-statistics-toolbox/h-how-directional-distribution-standard-deviation.htm>.
- [29] 覃雄林, 梁贤君, 覃春伟, 等. 广西贵港市 2007-2017 年 HIV 阳性暗娼和艾滋病病例时空流行特征研究[J]. *中国热带医学*, 2019, 19(11): 1048-1053. DOI: 10.13604/j.cnki.46-1064/r.2019.11.10.
Qin XL, Liang XJ, Qin CW, et al. Spatio-temporal dynamics characteristics of HIV positive prostitute and AIDS epidemics in Guigang, Guangxi, 2007-2017[J]. *China Tropical Medicine*, 2019, 19(11): 1048-1053. DOI: 10.13604/j.cnki.46-1064/r.2019.11.10.
- [30] ESRI-ArcGIS. 中位数中心的工作原理[EB/OL]. (2020-01-01) [2021-05-18]. <https://desktop.arcgis.com/zh-cn/arcmap/latest/tools/spatial-statistics-toolbox/h-how-median-center-spatial-statistics-works.htm>. ESRI-ArcGIS. Working principle of median center[EB/OL]. (2020-01-01) [2021-05-18]. <https://desktop.arcgis.com/zh-cn/arcmap/latest/tools/spatial-statistics-toolbox/h-how-median-center-spatial-statistics-works.htm>.
- [31] ESRI-ArcGIS. 平均中心[EB/OL]. (2020-01-01) [2021-05-18]. <https://desktop.arcgis.com/zh-cn/arcmap/latest/tools/spatial-statistics-toolbox/mean-center.htm>. ESRI-ArcGIS. Working principle of mean center[EB/OL]. (2020-01-01) [2021-05-18]. <https://desktop.arcgis.com/zh-cn/arcmap/latest/tools/spatial-statistics-toolbox/mean-center.htm>.
- [32] 张永树, 杨振凯, 訾璐, 等. 中国艾滋病空间格局和时空演化分析[J]. *地球信息科学学报*, 2020, 22(2):198-206. DOI: 10.12082/dqxxkx.2020.190199.
Zhang YS, Yang ZK, Zi L, et al. Spatio-temporal Evolution of the AIDS Pattern in China[J]. *J Geo-Informat Sci*, 2020, 22(2):198-206. DOI:10.12082/dqxxkx.2020.190199.
- [33] 邢健男, 郭巍, 钱莎莎, 等. 中国 2005-2011 年注射吸毒人群艾滋病感染的空间分析[J]. *中华流行病学杂志*, 2014, 35(2):151-156. DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2014.02.011.
- [34] Xing JN, Guo W, Qian SS, et al. Spatial analysis on the HIV/AIDS infection status among injecting drug users in China, from 2005 to 2011[J]. *Chin J Epidemiol*, 2014, 35(2):151-156. DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2014.02.011.
李建涛, 黄飞, 陈伟, 等. 空间插值技术在流行病学中的应用[J]. *中国防痨杂志*, 2012, 34(12):760-763. DOI:CNKI:SUN:ZFLZ.0.2012-12-007.
- [35] Li JT, Huang F, Chen W, et al. The application of spatial interpolation method in the epidemiological studies[J]. *Chin J Antituberc*, 2012, 34(12):760-763. DOI:CNKI:SUN:ZFLZ.0.2012-12-007.
- [36] ESRI-ArcGIS. 空间插值的确定性方法[EB/OL]. (2020-01-01) [2021-05-18]. <https://pro.arcgis.com/zh-cn/pro-app/latest/help/analysis/geostatistical-analyst/deterministic-methods-for-spatial-interpolation.htm>. ESRI-ArcGIS. Deterministic method for spatial interpolation[EB/OL]. (2020-01-01) [2021-05-18]. <https://pro.arcgis.com/zh-cn/pro-app/latest/help/analysis/geostatistical-analyst/deterministic-methods-for-spatial-interpolation.htm>.
- [37] SuperMap iDesktop Java. 空间插值概述[EB/OL]. (2018-07-27) [2021-05-18]. <http://support.supermap.com.cn/SuperMap-iDesktop-Java/tools/InterpolationAnalysis/AboutInterpolation.html>. SuperMap iDesktop Java. Overview of spatial interpolation[EB/OL]. (2018-07-27) [2021-05-18]. <http://support.supermap.com.cn/SuperMap-iDesktop-Java/tools/InterpolationAnalysis/AboutInterpolation.html>.
- [38] Palk L, Blower S. Geographic variation in sexual behavior can explain geospatial heterogeneity in the severity of the HIV epidemic in Malawi[J]. *BMC Med*, 2018, 16(1): 22. DOI:10.1186/s12916-018-1006-x.
- [39] Schaefer R, Gregson S, Takaruzza A, et al. Spatial patterns of HIV prevalence and service use in East Zimbabwe: implications for future targeting of interventions[J]. *J Int AIDS Soc*, 2017, 20(1):21409. DOI:10.7448/ias.20.1.21409.
- [40] 秦倩倩. 中国 MSM 人群艾滋病流行时空特征及感染率推算模型应用[D]. 北京:中国疾病预防控制中心, 2017.
Qin QQ. Temporal-spatial analysis on HIV epidemic and estimation of HIV prevalence among men who have sex with men in China[D]. Beijing:Chinese Center for Disease Control and Prevention, 2017.
- [41] Shand L, Li B, Park T, et al. Spatially varying

- auto-regressive models for prediction of new human immunodeficiency virus diagnoses[J]. *J R Stat Soc Series B Stat Methodol*, 2018, 67(4): 1003-1022. DOI: 10.1111/rssc.12269.
- [41] 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. DOI:10.11821/dlxb201701010. Wang JF, Xu CD. Geodetector: Principle and prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134. DOI: 10.11821/dlxb201701010.
- [42] 刘萌萌, 黄晓军, 常文辉, 等. 中国艾滋病分布时空演化及影响因素研究[J]. *中国卫生统计*, 2020, 37(1):116-120. Liu MM, Huang XJ, Chang WH, et al. Research on temporal space evolution and influencing factors in HIV/AIDS distribution[J]. *Chin J Health Stat*, 2020, 37(1):116-120.
- [43] ESRI-ArcGIS. 普通最小二乘法 (OLS) [EB/OL]. (2020-01-01) [2021-05-18]. <https://desktop.arcgis.com/zh-cn/arcmap/latest/tools/spatial-statistics-toolbox/ordinary-least-squares.htm>. ESRI-ArcGIS. Ordinary least squares (OLS) [EB/OL]. (2020-01-01) [2021-05-18]. <https://desktop.arcgis.com/zh-cn/arcmap/latest/tools/spatial-statistics-toolbox/ordinary-least-squares.htm>.
- [44] ESRI-ArcGIS. 地理加权回归 (GWR) [EB/OL]. (2020-01-01) [2021-05-18]. <https://desktop.arcgis.com/zh-cn/arcmap/latest/tools/spatial-statistics-toolbox/geographically-weighted-regression.htm>. ESRI-ArcGIS. Geographically weighted regression (GWR) [EB/OL]. (2020-01-01) [2021-05-18]. <https://desktop.arcgis.com/zh-cn/arcmap/latest/tools/spatial-statistics-toolbox/geographically-weighted-regression.htm>.
- [45] 杨尧, 李功权. 中国近年艾滋病空间分布及影响因素分析[J]. *中国艾滋病性病*, 2018, 24(12): 1208-1211. DOI: 10.13419/j.cnki.aids.2018.12.08. Yang Y, Li GQ. Spatial distribution and influencing factors of AIDS in China in recent years[J]. *Chin J AIDS STD*, 2018, 24(12):1208-1211. DOI:10.13419/j.cnki.aids.2018.12.08.
- [46] Arbona SI, Barro AS. Exploring the spatial determinants of late HIV diagnosis in Texas[J]. *Prev Chronic Dis*, 2020, 17:190346. DOI:10.5888/pcd17.190346.
- [47] Muleia R, Boothe M, Loquiha O, et al. Spatial distribution of HIV prevalence among young people in Mozambique [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2020, 17(3):885. DOI: 10.3390/ijerph17030885.
- [48] Hallowell BD, Robb SW, Kintziger KW. Comparing the geographic distribution and location characteristics of HIV-seropositive and HIV-seronegative individuals with a diagnosis of cancer living in the southeast US[J]. *Spat Spatiotemporal Epidemiol*, 2018, 24:11-18. DOI:10.1016/j.sste.2017.10.002.
- [49] 张亚慧, 张辉国, 胡锡健. 利用地理加权泊松回归模型分析宏观因素对艾滋病疫情的影响[J]. *中国艾滋病性病*, 2016, 22(10):817-821. DOI:10.13419/j.cnki.aids.2016.10.15. Zhang YH, Zhang HG, Hu XJ. Influence of macroscopic factors on the incidence of HIV/AIDS based on the geographically weighted Poisson regression model[J]. *Chin J AIDS STD*, 2016, 22(10):817-821. DOI:10.13419/j.cnki.aids.2016.10.15.
- [50] 孙舒曼, 李智明, 张辉国, 等. 2011-2016年中国艾滋病疫情时空特征分析[J]. *中华疾病控制杂志*, 2018, 22(12):1207-1210, 1215. DOI:10.16462/j.cnki.zhjbkz.2018.12.002. Sun SM, Li ZM, Zhang HG, et al. Temporal-spatial characteristic analysis of AIDS/HIV epidemic during 2011-2016 in China[J]. *Chin J Dis Control Prev*, 2018, 22(12): 1207-1210, 1215. DOI: 10.16462/j.cnki.zhjbkz.2018.12.002.
- [51] Wand H, Reddy T, Ramjee G. Investigating spatial disparities in high-risk women and HIV infections using generalized additive models: Results from a cohort of South African women[J]. *Spat Spatiotemporal Epidemiol*, 2019, 30:100283. DOI:10.1016/j.sste.2019.100283.
- [52] Goswami ND, Schmitz MM, Sanchez T, et al. Understanding local spatial variation along the care continuum: the potential impact of transportation vulnerability on HIV linkage to care and viral suppression in high-poverty areas, Atlanta, Georgia[J]. *J Acquir Immune Defic Syndr*, 2016, 72(1): 65-72. DOI: 10.1097/qai.0000000000000914.
- [53] Yao J, Agadjanian V. Bypassing health facilities in rural Mozambique: spatial, institutional, and individual determinants[J]. *BMC Health Serv Res*, 2018, 18(1):1006. DOI:10.1186/s12913-018-3834-y.
- [54] Weiss K, Karuchit S, Pattanasin S, et al. Spatial characteristics of men who have sex with men and transgender women attending HIV voluntary counselling and testing in Bangkok, Thailand, 2005-2015[J]. *Geospat Health*, 2020, 15(1):42-49. DOI:10.4081/gh.2020.790.
- [55] Palk L, Okano JT, Dullie L, et al. Travel time to health-care facilities, mode of transportation, and HIV elimination in Malawi: a geospatial modelling analysis[J]. *Lancet Glob Health*, 2020, 8(12): e1555-1564. DOI: 10.1016/s2214-109x(20)30351-x.
- [56] 陈清峰, 王冬梅, 何战英, 等. 地理信息系统在全国艾滋病综合防治示范区的应用[J]. *中国艾滋病性病*, 2007, 13(2): 156-157. DOI: 10.3969/j. issn. 1672-5662.2007.02.021. Chen QF, Wang DM, He ZY, et al. Development and application of GIS in China Comprehensive AIDS Response [J]. *Chin J AIDS STD*, 2007, 13(2):156-157. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5662.2007.02.021.
- [57] 夏尚, 薛靖波, 高风华, 等. Sentinel-1A 雷达遥感数据模型快速识别洪灾后血吸虫病传播潜在风险区研究[J]. *中国寄生虫与寄生虫病杂志*, 2020, 38(4): 417-422. DOI: 10.12140/j.issn.1000-7423.2020.04.003. Xia S, Xue JB, Gao FH, et al. Sentinel-1A radar remote sensing-based modeling for quick identification of potential risk areas of schistosomiasis transmission after flood[J]. *Chin J Parasitol Parasit Dis*, 2020, 38(4):417-422. DOI:10.12140/j.issn.1000-7423.2020.04.003.
- [58] Meliker JR, Sloan CD. Spatio-temporal epidemiology: principles and opportunities[J]. *Spat Spatiotemporal Epidemiol*, 2011, 2(1): 1-9. DOI: 10.1016/j. sste. 2010.10.001.
- [59] 王晓风, 张业武, 马家奇. 基于地理探测器的我国西南部分地区细菌性痢疾发病影响因素分析[J]. *中华流行病学杂志*, 2019, 40(8):953-959. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2019.08.015. Wang XF, Zhang YW, Ma JQ. Factors influencing the incidence of bacterial dysentery in parts of southwest China, using data from the geodetector[J]. *Chin J Epidemiol*, 2019, 40(8): 953-959. DOI: 10.3760/cma. j. issn.0254-6450.2019.08.015.