

白仙富, 戴雨茨. 昆明市应急避难场所的空间分布特征及其分异成因[J]. 华南地震, 2024, 44(1): 32-42. [BAI Xianfu, DAI Yuqian. The Spatial Distribution Characteristics of Emergency Shelters in Kunming and Its Differentiation Causes [J]. South China journal of seismology, 2024, 44(1): 32-42]

昆明市应急避难场所的空间分布特征及其分异成因

白仙富¹, 戴雨茨²

(1. 中国地震局昆明地震预报研究所, 昆明 650224; 2. 昆明市西山区防震减灾局, 昆明 650000)

摘要: 应急避难场所是城市防灾能力建设的重要内容, 通过对昆明市 14 个县市区应急避难所进行数据采集与整合, 分别从人口、社会、经济、地震动参数四个维度选取 7 个变量, 以空间分异性视角出发, 采用地理探测器方法对应急避难所数量面积的空间分布差异及影响因子关系进行分析。结果表明: GDP、应急避难所数量、人口规模、人口密度、地震动峰值加速度、公共预算支出和防震减灾机构独立性都是影响应急避难场所面积分布的因素, 因子的显著程度依次是 GDP、应急避难所数量、人口密度、人口规模、地震动峰值加速度、公共预算支出和防震减灾机构独立性; 交互因子探测分析结果显示, 7 个影响因素的两两交互作用均大于单个因素的作用, 说明昆明市应急避难场所面积的空间分布是多种因素共同作用的结果。GDP、人口规模和人口密度结合避难场所数量的交互作用最强, 说明经济水平、应急避难所数量和人口密度是影响应急避难场所面积的最重要驱动因素。昆明市应急避难场所面积与其人口规模尚不匹配, 未来应急避难场所面积达标最重要的途径是尽快提高当地的发展水平。

关键词: 应急避难场所; 空间分异性; 影响因素; 地理探测器

中图分类号: TU984.116

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2024)01-0032-11

DOI: 10.13512/j.hndz.2024.01.04

Spatial Distribution Characteristics of Emergency Shelters in Kunming and Its Differentiation Causes

BAI Xianfu¹, DAI Yuqian²

(1. Kunming Institute of Earthquake Prediction, CEA, Kunming 650224, China; 2. Earthquake Prevention and Disaster Mitigation Bureau of Xishan District, Kunming 650000, China)

Abstract: The construction of emergency shelters is important for evaluating urban disaster prevention capabilities. By collecting and integrating data on emergency shelters in 14 counties and prefectures of Kunming City, seven variables are selected from four dimensions of population, social, economic and seismic parameters. From the perspective of spatial differentiation, the geographical detector method is adopted for analyzing the spatial distribution differences in the number and area of emergency shelters and the relationships between influencing factors. The results show that GDP, the number of emergency shelters, population size, population density,

收稿日期: 2023-09-10

基金项目: 地震科技星火计划攻关项目(XH22005C、XH23003C); 云南省重点研发计划(202203AC100003); 云南省科技人才与平台计划(202405AC350051); 云南省地震科技创新团队(CXTD202406)共同资助。

作者简介: 白仙富(1979-), 男, 博士, 高级工程师, 硕士研究生导师, 主要从事山地灾害防治与环境保育、地震滑坡灾害风险评估基础理论与关键技术研究。

E-mail: 282961394@qq.com

peak ground acceleration(PGA), public budget expenditure and the independence of earthquake prevention and disaster mitigation institutions serve as the seven influencing factors for the area distribution of emergency shelters, with the greatest significance of GDP, followed by the number of emergency shelters, population density, population size, PGA, public budget expenditure and the independence of earthquake prevention and disaster mitigation institutions in sequence. According to the detection analysis of interaction factors, the interaction effect between any two of these seven influencing factors is greater than the effect of a single factor, indicating that the spatial distribution of emergency shelter area in Kunming is the result of multiple factors. The strongest interaction between GDP, population size, population density, and the number of shelters indicates that GDP, the number of emergency shelters and population density are the most important influencing factors for the area of emergency shelters. Since the emergency shelter area in Kunming is not yet proportional to its population, the most important way to meet the standard of emergency shelter area in the future is to improve the level of local economic development as soon as possible.

Keywords: Emergency shelter; Spatial heterogeneity; Influencing factor; Geographical detector

0 引言

随着全球城市化进程的发展,城市面临的自然灾害风险也在不断增加。应急避难场所是城市应对地震、火灾、爆炸、洪水、疫情等突发公共事件灾民安置的必要设施,也是维护人民群众生命财产安全和社会稳定、最大限度减少灾害损失的重要保障。为了应对频繁发生的自然灾害,提升城市的防灾减灾能力、提高灾后救援救助效率、以及最大限度地减轻自然灾害造成的城市经济损失风险,许多城市都在不断发展自身的应急避难场所。建立和完善应急避难场所已成为城市防灾能力建设的一项重要内容。

2003年中国第一个应急避难场所在北京元大都遗址公园建成,中国对应急避难场所建设逐渐重视,国家层面制定了应急避难场所建设的国家标准和相关法规,如《关于推进地震应急避难场所建设的意见》、《地震应急避难场所场址及配套设施国家标准》和《国家综合防灾减灾规划(2011—2015年)》等。云南省也在《云南省防震减灾条例》中将应急避难场所的建设列为防震减灾规划的重要内容。昆明市根据地方实际出台了《昆明市地震应急避难场所分类评定标准》详细规定了地震应急避难场所的规划、建设、管理等方面相关内容,为地震应急避难场所建设和管理提供了政策支持。

应急避难场所的研究已成为政府相关部门和学术界关注的热门课题。关于应急避难场所的研究,国内外研究呈现出不同的研究特点。国外对应急避难场所的研究主要关注应急避难场所中失去固定居所的人员安置^[1-2]、居住者医疗卫生问

题^[3-4]。国内对应急避难场所的研究主要围绕避难场所的规划原则、规划方法、设计要求等开展^[5],研究内容包括某一特定应急避难场所的选址、空间布局、服务能力与范围、路径优化、可达性和适宜性评价等^[6-12],其研究区域包括北京、福州、上海、银川等大城市及玉树县、嵩明等小县城^[7,10,11,13-16],不同学科背景的学者们综合运用地理信息系统、灾害学、管理学、公共安全等领域的知识探讨了应急避难场所布局的合理性和适宜性。总体来看,国外在应急避难所建设方面已有相对完善的体系,其研究重点更为关注启用应急避难所后受灾人群的行为特点。相比之下,我国当前仍处于应急避难所建设的初期阶段,对应急避难所的研究多集中在城市个体或中、微观层面,对多个城市群体应急避难所的分布差异研究较少,也鲜有涉及其背后的驱动因子。

本文选取市/县行政单元尺度,通过对昆明市不同区县应急避难所进行数据采集与整合,以县域为基本单元分析应急避难所的空间分布特征,用空间方差分析方法对多个县区应急避难所数量面积的空间分布差异及影响因子关系进行定量描述。本研究有助于政策制定部门从宏观角度了解全市应急避难所的现状,并结合当地实际情况为未来应急避难所建设提供科学依据。

1 研究方法和数据处理

1.1 研究区概况

昆明市是云南省的省会,也是西南地区的中心城市之一,位于云贵高原中部,总体地势北部

高,南部低,由北向南呈阶梯状逐渐降低。昆明市辖呈贡区、五华区、盘龙区、官渡区、西山区、晋宁区、东川区7个区和嵩明县、宜良县、富民县、石林县彝族自治县、禄劝县彝族苗族自治县、寻甸县回族彝族自治县6个县,代管安宁市1个县级市,2020年末,昆明市总人口846.30万人,其中城镇人口674.25万人,占总人口的79.67%;全市人均国内生产总值80 584元。新构造分区中,昆明处于川滇断块隆起区内的昆明凹陷三级新构造区内,是区域新构造隆起背景上的滇东强烈断陷湖盆区的主要组成部分。昆明盆地是云南高原规模最大的第四纪继承性断陷盆地,主要由南北向普渡河第四纪活动断裂控制,同时还受北东、北西等多组方向第四纪活动断裂影响,形成异常复杂的盆地基底形态。在地震带划分中,昆明夹持于小江断裂南北向强震带和易门断裂南北向中强地震带之间,并处于普渡河断裂南北向中强地震带上。目前已探明通过昆明市的主要断裂有:小江断裂带、普渡河断裂带、富民一车家碧断裂带、黑龙潭一官渡断裂带、白邑一横冲断裂带。此外,南部有北西向的通海石屏地震带;西部有近南北向的汤郎易门中强地震带;东部有强地震活动区向弱地震活动区过渡的宣威弥勒地震带。其中,小江断裂带对昆明地区的影响处于主要地位,其次,普渡河中强地震带、汤郎易门中强地震带和区外通海石屏地震带也有一定的影响。断裂构造对地质环境的影响比较复杂,断裂活动使得断裂带及其周围地质体的完整性遭到破坏,岩体力学强度降低,易引发地质灾害。

总体看,昆明市的主要自然灾害有地震灾害、地质灾害、气象灾害、水旱灾害、森林火灾等5大类14个灾种。地震是昆明市潜在的最严重的自然灾害之一,一旦发生严重地震事件,影响将十分巨大。昆明具有典型的亚热带季风气候特征,夏季炎热多雨、冬季温暖干旱,北部县区部分乡镇因地处乌蒙山系,时有地质灾害如崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害发生。昆明偶发的气象灾害包括暴雨、冰雹、大风、低温、干旱、高温、雷电、台风、雪灾,水旱灾害包括洪水、干旱。近年来干旱、高温、暴雨灾害呈现逐渐加剧的趋势。

1.2 研究方法

昆明市各县区应急避难场所空间差异受多因素影响和制约,已有研究大多针对单个应急避难

场所的服务能力进行评价,对某一特定区域多因子影响的空间差异研究相对较少。空间差异分析的常用方法有主成分分析法、多元线性回归法及地理空间探测器方法。主成分分析法和多元线性回归法是统计学方法,对于空间差异的分析功能较弱。地理探测器是基于方差分析提出的用于探测空间分异性,揭示其背后驱动因子的一种新的空间统计学方法,由于地理空间探测器方法没有线性假设,因此具有简洁的形式和明确的物理含义,其基本思想是假设某个自变量对某个因变量有重要影响,则自变量和因变量的空间分布应该具有相似性^[17-18]。地理探测器最早应用于医学地理研究领域探查各地理要素对地方性疾病的影响,之后应用范围逐步扩大到与地理空间相关的研究领域,如城市的建设用地变化^[19-20]、居民宜居满意度^[21]、房价影响因素^[22]等。

本文采用地理探测器中的因子探测及交互作用探测来分析昆明市县域尺度不同应急避难场所空间分布的影响因素及交互作用。空间分异性是一种普遍存在的地理现象,地理探测器方法的主要目的就是空间分异性进行定量化表达。

分异和因子探测是地理探测器的一个重要功能,其作用是探测某一个因子 X 对于属性 Y 的空间分异性的解释程度有多大,具体用 q 统计量来表示,表达式为:

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

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

$$SST = N \sigma^2 \quad (3)$$

式中: $h=1, 2, \dots, L$ 为因子 X 或变量 Y 的分层(Strata),即分类或分区; N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h 和全区的 Y 值的方差。 SSW 和 SST 分别为层内方差之和(Within Sum of Squares)和全区总方差(Total Sum of Squares)。 q 的值域介于 $[0, 1]$, q 值越大说明 Y 的空间分异性越明显;如果分层是由自变量 X 生成的,则 q 值越大表示自变量 X 对属性 Y 的解释力越强,反之则越弱。极端情况下, q 值为1表明因子 X 完全控制了 Y 的空间分布, q 值为0则表明因子 X 与 Y 没有任何关系, q 值表示 X 解释了100%的属性 Y 。

交互作用探测可以识别不同风险因子 X_i 之间的交互作用,即评估因子 X_1 和 X_2 共同作用时是否会增加或减弱对因变量 Y 的解释力,或这些因子对 Y 的影响是相互独立的。评估的方法是首先分别计

算两种因子 X_1 和 X_2 对 Y 的 q 值: $q(X_1)$ 和 $q(X_2)$, 并且计算它们交互(叠加变量 X_1 和 X_2 两个图层相切所形成的新的多边形分布)时的 q 值: $q(X_1 \cap X_2)$ 并对 $q(X_1)$ 、 $q(X_2)$ 与 $q(X_1 \cap X_2)$ 进行比较, 交互作用所形成的结果有表 1 所示的五种可能。

表 1 交互作用探测结果
Table 1 Interaction detection results

判定依据	交互作用
$q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$	非线性减弱
$\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$	单因子
$\max[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2)$	非线性增强
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立
$q(X_1) + q(X_2) < q(X_1 \cap X_2)$	非线性增强

1.3 指标选取和数据来源

人口是决定应急避难场所规模和能力的重要因素, 应急避难场所的数量和容量需要根据人口规模进行合理规划, 以确保所有需要保护的人都能够得到适当的疏散和庇护。人口密度是用作评估地区人口分布均匀程度的指标, 因此人口规模和人口密度是用来描述和评估人口分布的重要概念。人口规模和人口密度对应急避难场所的需求量、资源分配、容纳能力和特殊需求等方面都有影响。

经济因素在应急避难场所建设和后期运行维护中扮演着重要的角色。区域经济发展水平制约着应急避难场所的建设规模和质量。应急避难场所的日常运营维护也需要政府长期支付费用承担。GDP 和公共预算是区域经济的直接表现。较高的 GDP 通常意味着更多的财政收入来源, GDP 值越大, 经济水平越高, 城市社会服务能力越强。公共预算影响着经济发展的可持续性, 足够的公共预算可以为应急避难场所建设和运行提供有力的财政支持。公共预算支出反映了一个县区的公共设施建设投入能力, 公共财政支出越高的县区, 能够为避难所建设和管理提供的资金支持也越大。实际情况中, 经济因素通常与其他因素一起影响应急避难场所的空间分布和规模。

昆明市县区的各级防震减灾机构是全市各类应急避难场所建设和管理的行业主管部门, 其机构的独立性对应急避难场所的建设和后期运行管理各过程都至关重要。如果防震减灾机构是独立设置的, 那么它的决策和行动可能会更加不受干扰, 应急避

难场所的建设可能会更加高效和有针对性^[23]。避难所数量可以从侧面反映避难所的规模和等级, 其数量多少虽然不是唯一的评价指标, 但却是衡量应急避难场所建设程度的重要标志之一。总之, 独立的防震减灾机构能够提供统一的组织与协调及更加专业的指导与技术支持, 从而提高避难场所的建设效率和服务质量, 较多的避难场所数量可以增加受灾人口的安全保障范围增强社会应对灾害的能力。

地震灾害历来以其高危险性和潜在影响广度而被称为“群灾之首”。昆明盆地是一个主要由南北向展布的小江断裂和普渡河断裂控制的云南规模最大的第四纪继承性断陷盆地, 盆地内部还同时受北东、北西等多组方向的第四纪活动断裂影响, 地震灾害是当地潜在风险最大的自然灾害, 也是应急避难场所建设中需要特别关注的灾种。地震动参数是描述地震破坏力的重要指标, 包括峰值加速度、反应谱和持续时间等。地震动峰值加速度是地震震动过程中, 地表质点运动的加速度的最大绝对值, 可以作为确定烈度的依据。在以烈度为基础的抗震设防标准中, 常根据相应的烈度确定其峰值加速度, 因此昆明市应急避难场所建设中, 抗震能力的考量是重中之重。

综上所述, 为了探究影响昆明市应急避难场所空间分布的驱动因素, 本文结合昆明市应急避难场所建设和主管部门是否为防震减灾局等情况, 分别从人口、经济、社会、地震动参数四个维度选取了 7 个变量具体包括 GDP、避难所个数、防震减灾机构独立情况、地震动峰值加速度、人口规模、人口密度和公共预算对与应急避难场所建设关系最密切的影响因子进行研究。

文中使用的昆明市县域尺度应急避难所名录来自昆明市防震减灾局《关于昆明市地震应急避难场所分类评定结果的通报》和公开互联网可获取的应急避难所。GDP、人口规模和人口密度来自昆明市统计局 2021 年统计年鉴(网址 <https://tjj.km.gov.cn/2021tjnj/indexch.htm>)。地震动峰值加速度来自《中国地震动参数区划图》宣贯教材^[24], 机构独立情况来自对各县区地震主管机构的调查。应急避难场所的总面积则利用 Bigmap 进行测量而得。由于地理探测器分析方法要求自变量为类型变量, 本文在 ArcGIS 中使用自然断点分类方法将人口、人口密度、GDP、避难所个数、机构独立、地震动参数(峰值加速度)、公共预算进行分类。

2 昆明市应急避难场所及影响因素的空间分布特征

2.1 应急避难场所面积的空间分布

本文采用 ArcGIS 来绘制昆明市各县区应急避难场所面积的空间分布图(图1)。由图1可以看出,昆明市应急避难场所面积在市域范围内分布不均衡,呈贡区和安宁市应急避难场所面积最大,五华区、盘龙区和官渡区次之,嵩明县和东川区应急避难场所面积相对较小,这从侧面反映出不同区域开发强度与应急避难场所建设的相关性,呈贡区和安宁市是昆明市内开发较晚的区域,2008年后这两个区域开发强度加大,云南省属大中专

学校陆续迁入这两个地区形成大学校园较为集中的大学城。该时段恰逢汶川地震后,政府和公众的地震应急避险意识较之前有了极大提升。为进一步分析昆明市应急避难场所分布的空间均衡性,我们对数据进行了归一化处理,绘制了每万人拥有应急避难场所面积的空间分布图(图2),颜色越深则表示该县区人均应急避难场所面积拥有量越多。从图2可以发现,昆明市域内人均应急避难场所面积拥有量最多的是呈贡区,其次是安宁市和石林县。禄劝县、东川区和嵩明县的人均应急避难场所面积最少。昆明市最为重要的活动断裂小江断裂带跨东川、寻甸、嵩明展布,但东川、嵩明每万人拥有的应急避难设施相较其他县区来说却显著偏少,这与其地震发生的危险性是不相匹配的。

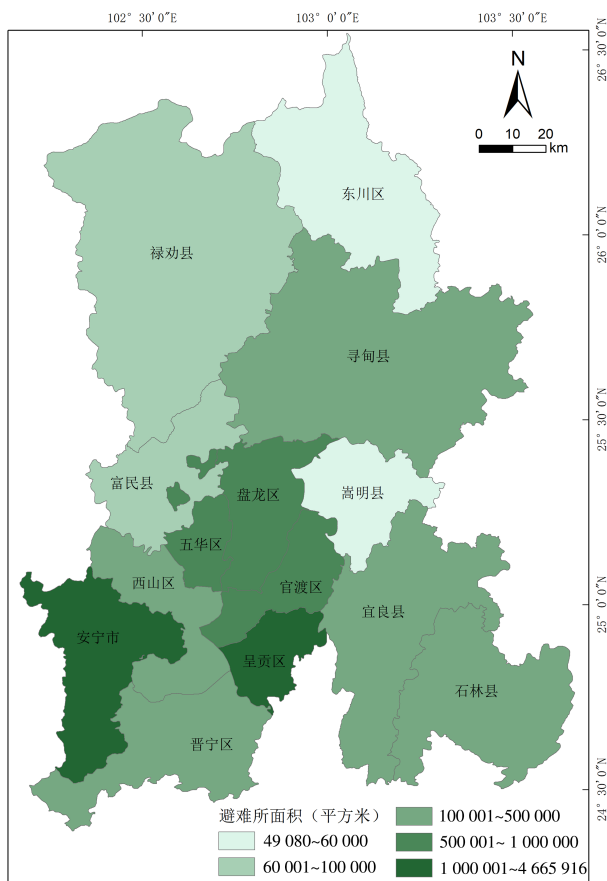


图1 2021年昆明市各县区应急避难场所面积的空间分布
Fig.1 Spatial distribution of emergency shelter areas in each county of Kunming City in 2021

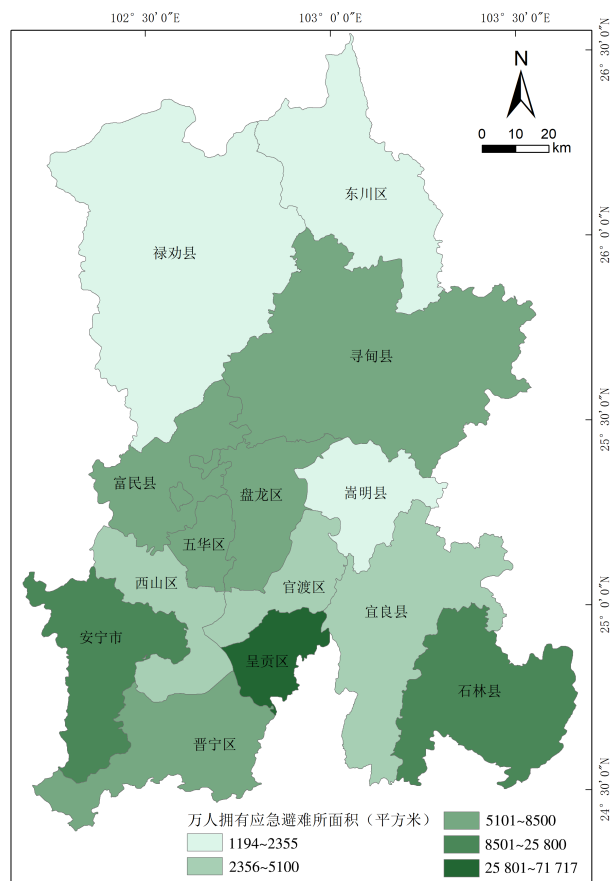


图2 2021年昆明市各县区每万人应急避难场所面积空间分布
Fig.2 Spatial distribution of emergency shelter area per 10 000 people in each county of Kunming City in 2021

2.2 七项影响因素的空间分布

本文绘制了GDP、应急避难所个数、机构独立情况、地震动峰值加速度、人口规模、人口密

度和公共预算支出7个影响各县区应急避难所面积因素的空间分布图(图3)。图3a的GDP总量空间分布显示,昆明市域内GDP总量最高的县区是五华区和官渡区,这三个区的GDP总量在2021年均超

1100.01 亿元;其次是西山区和盘龙区,这两个区 2021 年的 GDP 总量在介于 800 亿元至 1100 亿元之间;呈贡区和安宁市 2021 年的 GDP 总量介于 500 亿元至 800 亿元之间;晋宁区和宜良县 GDP 总量介于 200 亿元至 500 亿元间;富民县、石林县、嵩明县、寻甸县、禄劝县和东川区 GDP 总量均小于 200 亿元。GDP 总量作为衡量一个地区经济水平的重要指标,可以较好地反映出该县区的经济发展状况,昆明市各县区 GDP 总量差异显著,与图 1 对比后,可以发现各县区应急避难所面积的多少与 GDP 总量具有一定的正相关性。由此可以初步判断,经济发展水平是影响该应急避难场所面积的重要因素。

图 3b 描述了各县区应急避难所数量分布。五华区和呈贡区应急避难所个数最多,均在 7 个以上。官渡区、安宁市和盘龙区应急避难所个数介于 5~6 个;石林县、西山区和寻甸县应急避难所个数均为 4 个;宜良县、晋宁区和禄劝县应急避难所个数都为 3 个;富民县、东川区和嵩明县应急避难所个数都少于 2 个,通过与 GDP 空间分布图对比可以发现总体上经济欠发达的县区应急避难所个数也相对较少。五华区是昆明市各县区中基础教育最为发达的县区,呈贡区则集中了云南省大多数高校,这从侧面反映出各县区应急避难场所数量的分布与各县区教育资源具有较大的正相关性。

图 3c 是各县区防震减灾机构独立状况的空间分布图。减轻地震灾害是一项宏大的社会目标,其工作内容包括震前的监测、工程抗震、震后应急救援、恢复重建等,此外还需要一系列社会活动参与,这就需要动员社会各方面力量来全面实施,因此必须由负有政府职能的机构来完成相关的组织和必要的协调^[23]。防震减灾机构设置独立与否一定程度上反映了当地政府部门对防震减灾工作的重视程度和当地潜在地震风险的大小。独立设置的机构通常具有明确的职责和使命,能够专注于防震减灾工作,使得机构能够更加高效、专业地推动避难场所的建设和管理。昆明市 14 个县区中,具有独立防震减灾机构的县区有 5 个,占比仅为 35.7%,这些具有独立防震减灾机构的县区主要集中在北部经济欠发达区域,也是地震风险相对较高区域。

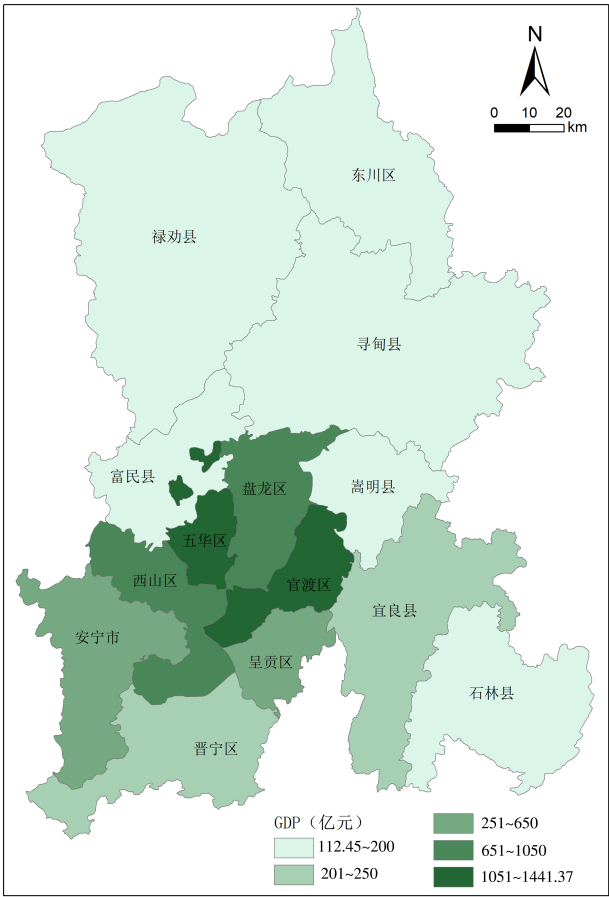
图 3d 是各县区地震动峰值加速度的空间分布图。局部场地条件对地震波的传播有较大的影响,

它表现为对地震动显著的放大或缩小作用,并直接影响到地震灾害程度的分布。地震动峰值加速度是工程结构抗震设计规范中地震动参数确定的基础性规范^[24]。昆明市辖区范围内抗震设防烈度较高,均处于 7 度区(0.10 g)以上,主城区基本处于 8 度(0.20 g)区,设防烈度最高的区域为东川—寻甸—嵩明—宜良,这四个县区内部分街道(乡镇)设防烈度高达 9 度(0.40 g)。

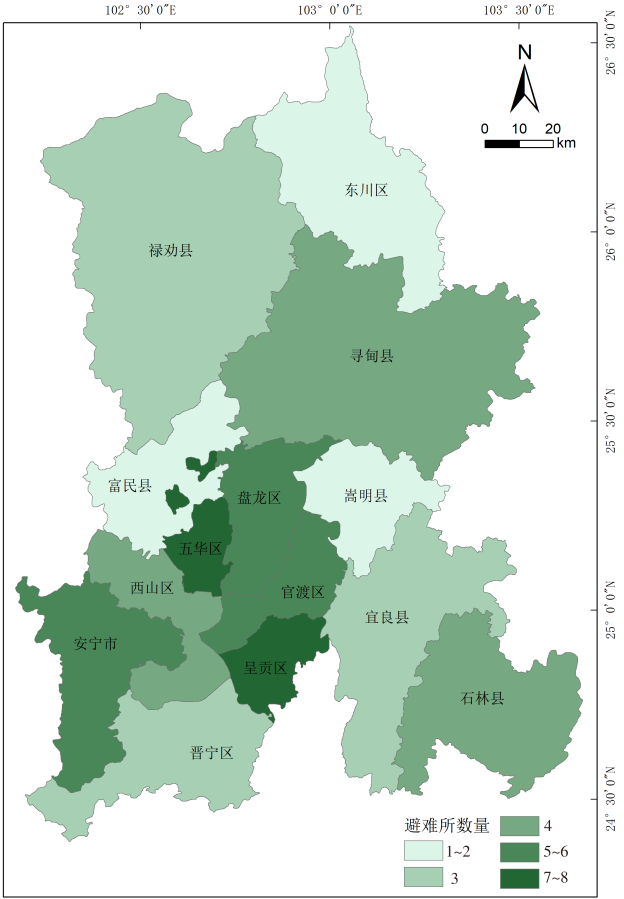
图 3e 是各县区人口规模的空间分布图。人口规模的空间分布是人口在某一特定时间段内在一定地域空间中的集散状态。人口规模空间分布图是人口发展演变过程在空间上的表现形式,它对灾害管理和风险评估具有重要意义,人口规模空间分布图可以帮助确定人口密集区的风险程度,在灾害发生时提供决策支持。整个昆明市区人口规模空间分布图表现为 3 个圈层,第一圈层包括五华、盘龙、西山和官渡四个主城区,其人口规模均超过 90 万;第二圈层是嵩明、寻甸、安宁和呈贡四个县区,人口规模介于 40 万~60 万;第三圈层是富民、石林、东川、晋宁、禄劝和宜良,其人口规模小于 40 万。

图 3f 是各县区人口密度的空间分布图。人口密度是表现人口分布的主要形式和衡量人口分布地区差异的重要指标,人口密度数据是支撑城市防灾避灾空间规划、应急避难设施建设决策的重要数据。昆明市各县区人口密度空间分布差异显著,1276 人/平方千米以上的区域有官渡、盘龙和五华区;人口密度介于 373~1275 人/平方千米的县区有西山和呈贡;人口密度介于 202~372 人/平方千米的县区有嵩明、安宁和晋宁;人口密度介于 90~201 人/平方千米的县区有东川、富民、寻甸、石林和宜良;人口密度小于 90 人/平方千米的仅有禄劝。

图 3g 是昆明市各县区公共财政支出的情况。各县区公共财政支出差异明显,公共财政支出最多的区域为安宁和官渡,公共财政支出超 600 000 万元;其次是五华、盘龙、西山,公共财政支出介于 400 001 万元至 500 000 万元;东川、禄劝、呈贡和寻甸四个县区公共财政支出介于 350 001 万元至 400 000 万元;所有县市区中,富民公共财政支出最少,其年度公共财政支出小于 200 000 万元。



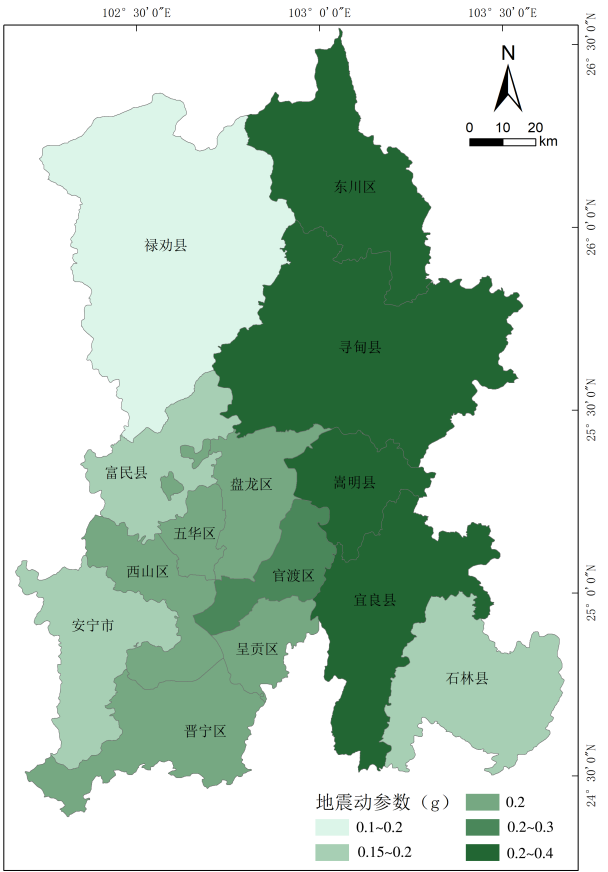
a GDP 总量



b 应急避难场所数量



c 防震减灾机构



d 地震动峰值加速度

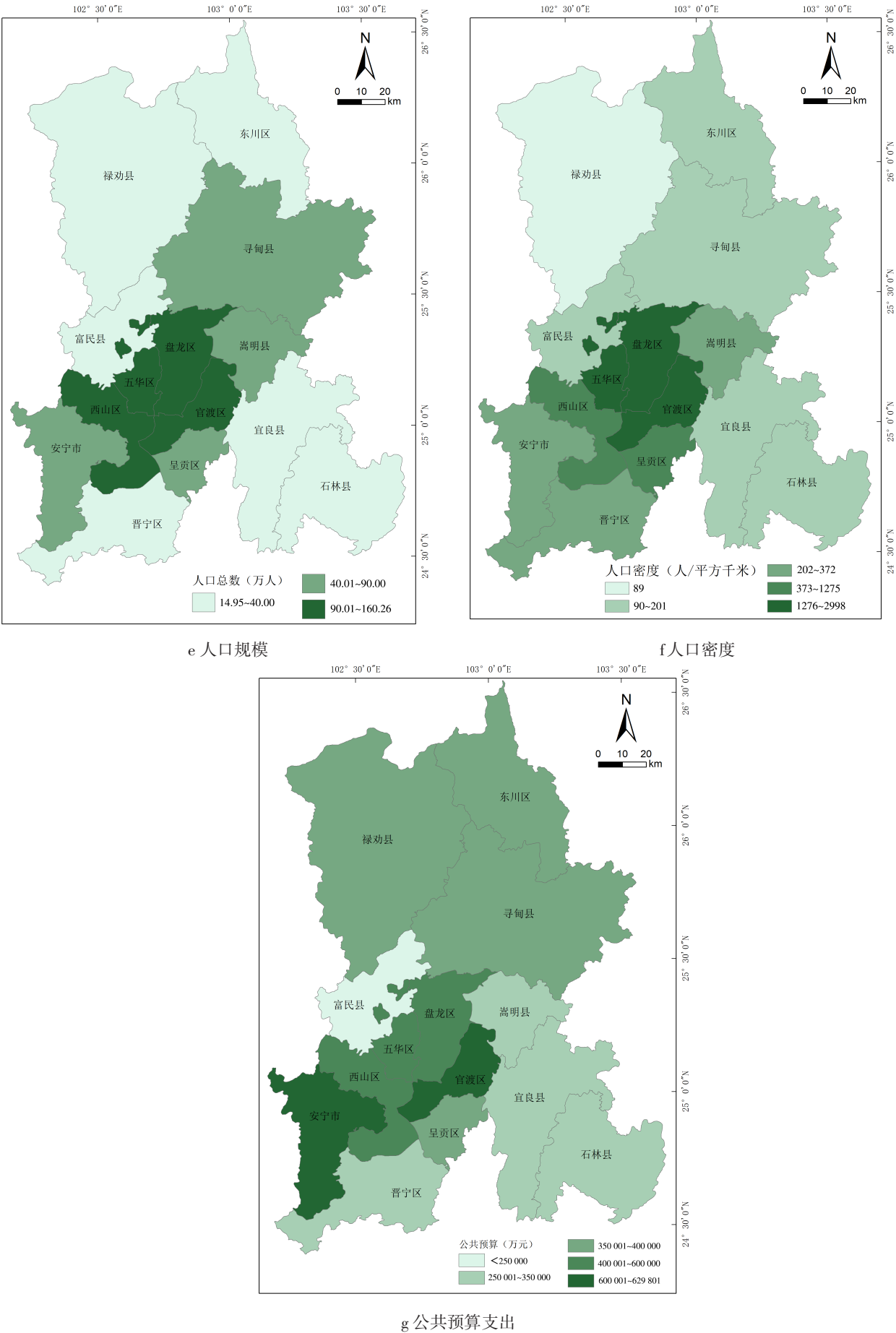


图3 7个影响因素的空间分布
Fig.3 Spatial distribution of seven influencing factors in each county of Kunming City in 2021

3 结果分析

3.1 因子探测结果

表2 中的因子探测分析结果显示，我们选取的7个自变量均通过了1%的显著性检验，换言之，这7个变量是影响昆明市14个县区应急避难场所空间分布的重要驱动因素。表中 q 值的大小表示因变量 Y (应急避难场所面积)在多大程度上受自变量 X 的影响，这7个影响因素对昆明市县区应急避难场所面积的空间分布解释力从大到小排列依次是GDP>避难所数量>人口密度>人口规模>地震动峰值加速度>公共预算支出>机构独立性。7个自变量中，因子解释力最大的是GDP(0.6730)，GDP是衡量一个地区经济水平的重要指标，一个地区应急避难场所的面积与地区GDP水平高度相关，较高的GDP可能意味着该地区有更多的经济资源可以投入到应急避难场所的建设和维护上。避难所的数量，这间接反映了昆明市应急避难场所的等级并不太高，各县区应急避难场所面积的大小主要还是受限于数量的多少。第三和第四分别是人口密度和人口规模，这说明昆明市各县区应急避

难场所建设具有一定的规划理念，充分考虑了人口总量和人口密度的因素。地震灾害的轻重与场地局部效应息息相关，尤其是位于沉积盆地或松软冲积层上的建筑，地震波经过后，某些频率的振幅常常被显著放大而造成严重灾害。地震动峰值加速度是表示发生地震时建筑物受到最大地震作用力的大小，该值越大，表明建筑物的潜在可能受损程度越大，对应急避难所的需求也越大，但该自变量对应变量的解释力并不太强，说明昆明市在推进应急避难场所建设时对抗震设防能力考虑的权重还应该加大。机构独立性和公共预算支出对各县区应急避难场所的解释力不强，我们分析其原因可能在于昆明市应急避难场所建设过程中各县区主要依据市级防震减灾部门下达任务而开展，且均为利用现有的广场、体育场(馆)、公园、绿地、学校操场和露天大型停车场等进行改造而成，对公共预算支出的依赖性不大。

3.2 交互作用探测

本文利用地理探测器中的交互探测方法来检测不同因子在影响应急避难场所面积的空间分布方面的交互作用。7个因子的交互作用结果共有21对(表3)。

表2 因子探测分析结果
Table 2 Factor detection results

参数	避难所个数	机构独立	地震动峰值加速度	人口规模	人口密度	公共预算支出	GDP(亿元)
q 值	0.5668	0.1338	0.2228	0.2518	0.4763	0.1475	0.6730
p 值	0.2775	0.2337	0.6976	0.3179	0.4141	0.8431	0.1461

表3 交互作用探测表
Table 3 Interaction detection table

参数	避难所数量	机构独立	地震动峰值加速度	人口规模	人口密度	公共预算	GDP(亿元)
避难所个数	0.5668						
机构独立	0.5986	0.1338					
地震动峰值加速度	0.6100	0.3591	0.2228				
人口规模	0.9980	0.6967	0.9927	0.2518			
人口密度	0.9985	0.5538	0.5561	0.9592	0.4763		
公共预算	0.9896	0.9827	0.9931	0.5125	0.9960	0.1475	
GDP(亿元)	0.9995	0.6976	0.9928	0.6964	0.9956	0.9915	0.6731

交互作用探测结果表明7个自变量之间进行交互探测后出现了10对双因子增强和11对非线性增强的现象,即因子解释力在进行双变量交互后显著上升。由此可以看出,任意两个自变量在交互之后的影响力比原来单独的因子具备更强的解释力,这充分说明应急避难场所面积的空间分布实际上是多种因素共同影响的结果。从 q 值大小的排名来看,GDP与避难所数量的交互作用最强(0.9995);避难所数量与人口密度的交互作用排名第二(0.9985),避难所数量与人口总量的交互作用排名第三(0.9980),公共预算支出与人口密度的交互作用排名第四(0.9960),GDP与人口密度的交互作用排名第五(0.9956),公共预算支出与地震动峰值加速度的交互作用排名第六(0.9931),GDP与地震动峰值加速度的交互作用排名第七(0.9928)。其他因子之间的交互作用均弱于上述七项,这表明GDP、避难所数量和人口密度对应急避难所面积的空间分布影响最为显著。

结合上述的因子探测结果可知7种驱动因素都是影响应急避难场所面积空间分布差异的重要因子。GDP、人口规模和人口密度结合避难所数量这一变量后对应应急避难场所面积分布差异的解释最强,说明应急避难场所面积的空间分布差异本质上还是各个县区应急避难场所数量的差距;不同县区应急避难场所面积多少依然很大程度上取决于其社会经济条件。换言之,人口规模和人口密度都较大的地区,需要依靠较强的经济条件才能解决面对地震风险所需的应急避难场所面积达标问题,这对于经济条件较好的昆明主城区可以较好地实现,但是对于人口规模和人口密度较大且经济水平相对较低的县区来说依然是一项较大的挑战。

4 结论与政策建议

本文采用地理探测器方法对昆明市14个县区应急避难场所面积的空间分布进行了7个影响因子的影响力探测分析,从结果看,昆明市不同县市区GDP、应急避难所数量、人口规模、人口密度、地震动峰值加速度、公共预算支出和防震减灾机构独立性都是影响应急避难场所面积分布因素,其中最显著的因子依次是GDP、应急避难所数量和人口密度。

(1)总体上看,昆明市14个县市区中呈贡、安宁和主城四区(五华、盘龙、西山和官渡)应急避

难场所面积较多。这些县区都具有大致相近的人口规模和密度,都是昆明市经济较为发达的地区,在应急避难场所的建设上具有较为突出的经济竞争优势。通常,人们经济上越富足,对逃生避灾设施的追求也越高,在经济条件允许的情况下,人们更倾向于加强应急避难场所的建设。人口规模和密度是区域城市化的重要体现,人口规模和密度越大对应应急避难场所面积的需求也越大。呈贡、安宁和主城四区(五华、盘龙、西山和官渡)经济相对发展,庞大的人口规模及稠密的人口分布对应应急避难场所有更多的需求,这也是促成应急避难场所建设的重要原因。

(2)7个影响因素中,GDP对应应急避难场所面积的影响最大,避难所数量和人口密度紧随其后,说明经济水平、应急避难所数量和人口密度是影响应急避难场所面积的最重要驱动因素。这暗示着未来解决应急避难场所面积达标最核心的途径还是快速地提高当地的经济发展水平;应急避难场所数量对应应急避难场所面积有着较大影响,表明昆明市高等级的避难所并不太多;高密度人口聚集区(五华、盘龙、西山和官渡)遭遇地震时,对避难所有着更多需求,因此人口密度对应应急避难所的分布有较强解释力。机构独立性对应应急避难场所面积的影响最小,说明昆明市各级防震减灾机构还应进一步主动作为,加强在避难所建设中的专业指导。

(3)GDP、应急避难场所数量、人口规模、人口密度、地震动峰值加速度、公共预算支出和机构独立性7个自变量指标进行交互后均出现了因子增强的情况,说明他们之间的共同作用相比单个因素能更大程度上影响城市应急避难所数量的空间分布。其中GDP、人口规模和人口密度结合避难所数量这一变量后与应急避难场所面积的关系更为密切,所以相对于单个自变量来说,一个县区应急避难场所面积实际上是受多因素共同作用的。不同县区的应急避难场所面积多少依然取决于其社会经济条件综合影响。

综上所述,昆明市14个县市区的应急避难场所空间分布更多受到GDP、人口规模、人口密度以及应急避难所数量的共同作用所影响。未来,随着昆明经济的持续迅速发展,主城四区(五华、盘龙、西山和官渡)、呈贡和安宁等地人口规模还会随着外来人口的涌入而增加,人口密度也会进一步提升,对应应急避难场所的需求还会进一步增加,为适应未来对应应急避难场所的需求,结合研

究结论,给出如下几点政策建议。

(1)昆明市2021年总人口为846.3万人,而应急避难场所面积仅996.91万平米,根据《地震应急避难场所 场址及配套设施(GB 21734-2008)》中人均居住面积应大于 1.5 m^2 的要求,昆明市现有应急避难场所最多可容纳664.6万人,未来各县区政府还应进一步加大大地震应急避难场所的建设。

(2)地理探测器结果表明对应急避难场所面积的影响因素中最积极的驱动因素为GDP,表明城市经济发展水平仍然是推进应急避难场所建设的最积极因素。

(3)布局合理、面积达标的防灾避险空间布局是现代社会的防灾减灾体系中不可或缺的第二道防线。应急避难场所面积达标需要考虑多个方面的因素,地方政府和各级防震减灾机构需要在经济、土地、人口规模、人口密度、人员配置和法律法规等方面进行全面考虑和规划,更应该不断创新地震应急避难场所建设的新机制,在公园、绿地、体育场馆、民防工程等建设过程中同步规划、建设和交付。

参考文献

- [1] Chu J Y, Su Y P. Comprehensive evaluation index system in the application for earthquake emergency shelter site [J]. Advanced Materials Research, 2010(156): 79-83.
- [2] Clark R E, Linda W, Flahive J M, et al. Health care utilization and expenditures of homeless family members before and after emergency housing[J]. American Journal of Public Health, 2018, 108(6): 808-814.
- [3] King B, Abrego D, Narendorf S, et al. Representations of homelessness, home environments, and authority in the context of runaway behaviors reported by foster care youth residing in an emergency shelter[J]. Journal of Social Distress and the Homeless, 2017, 26(2): 138-147.
- [4] Aubry T, Duhoux A, Ktodawsky F, et al. A longitudinal study of predictors of housing stability, housing quality, and mental health functioning among single homeless individuals staying in emergency shelters[J]. Am J Community Psychol, 2016, 58(1/2): 123-135.
- [5] 周爱华, 谌丽, 朱海勇, 等. 社区尺度的北京中心城区应急避难场所布局合理性研究[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(4): 1662-1669.
- [6] 王女英, 修春亮, 魏冶. 沈阳城市应急避难场所的识别、空间格局与服务功能[J]. 地域研究与开发, 2017, 36(5): 75-79.
- [7] 聂丽, 王艳慧. 基于两步移动搜寻法的居民应急避难场所可达性分析——以北京西部城区为例[J]. 地理信息世界, 2017, 24(6): 98-101.
- [8] 康琳, 朱军, 李维炼. 基于溃坝洪水模型的山区堰塞湖避难场所选址[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(5): 39-45.
- [9] 王培茗. 城市应急避难场所布局存在的问题及应对策略[J]. 城市与减灾, 2017, 36(5): 75-79.
- [10] 黄雍华. 基于GIS的上海市都市功能优化区应急避难场所适宜性评价与分析[D]. 上海: 上海师范大学, 2018.
- [11] 张沐晨, 林广发. 基于空间可达性的福州应急避难场所服务能力评价[J]. 海南师范大学学报(自然科学版), 2018, 31(3): 346-354.
- [12] 夏浩. 化工园区应急物资调度与人员疏散路径优化模型研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [13] 武文杰, 朱思源, 张文忠. 北京应急避难场所的区位优势配置分析[J]. 人文地理, 2010, 25(4): 41-44+35.
- [14] 孙嘉欣, 王晨曦, 余国良. 银川市地震应急避难场所适宜性评价[J]. 防灾减灾学报, 2022, 38(3): 63-70.
- [15] 靳一凡, 魏本勇, 苏桂武, 等. 青海玉树地区政府人员地震灾害认知特点的初步分析[J]. 灾害学, 2015, 30(4): 229-234.
- [16] 王进, 吴亮, 郭亚容, 等. 嵩明主城区地震灾害应急避难场所适宜性评价[J]. 西南林业大学学报, 2020, 4(5): 73-80.
- [17] 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.
- [18] Wang J F, Haining R, Liu T J, et al. Sandwich estimation for multi-unit reporting on a stratified heterogeneous surface [J]. Environment and Planning A: Economy and Space, 2013, 45(10): 2515-2534.
- [19] 李进涛, 刘彦随, 杨园园, 等. 1985—2015年京津冀地区城市建设用地时空演变特征及驱动因素研究[J]. 地理研究, 2018, 37(1): 37-52.
- [20] 湛东升, 张文忠, 余建辉, 等. 基于地理探测器的北京市居民宜居满意度影响机理[J]. 地理科学进展, 2015, 34(8): 966-975.
- [21] Ju H R, Zhang Z X, Zuo L J et al. Driving forces and their interactions of built-up land expansion based on the geographical detector: A case study of Beijing, China[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2016, 30(11): 2188-2207.
- [22] Wang Y, Wang S J, Li G D, et al. Identifying the determinants of housing prices in China using spatial regression and the geographical detector technique[J]. Applied Geography, 2017(79): 26-36.
- [23] 孙书海. 浅谈防震减灾中的地方地震工作[J]. 国际地震动态, 2003, 295(7): 32-34.
- [24] 中国国家标准化管理委员会. 中国地震动参数区划图: GB 18306-2015[S]. 北京: 中国质检出版社, 2015.