引文格式:方云皓,张为,袁娜娜,等.武汉都市发展区城乡高温脆弱性评估对比研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(4):802-813.DOI:10.13203/j.whugis20230450

Citation: FANG Yunhao, ZHANG Wei, YUAN Nana, et al. Comparative of Urban and Rural High Temperature Vulnerability Assessment in Wuhan Metropolis Based on Multi-source Data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(4):802-813.DOI:10.13203/j.whugis20230450

武汉都市发展区城乡高温脆弱性评估对比研究

方云皓[1,2] 张 为[3] 袁娜娜[4] 丁 伟[1,2]

1 华中科技大学建筑与城市规划学院,湖北 武汉,430074
2 湖北省城镇化工程技术研究中心,湖北 武汉,430074
3 浙江大学建筑设计研究院有限公司,浙江 杭州,310028
4 杭州境合规划设计研究院有限公司,浙江 杭州,311100

摘 要:在全球变暖及城乡融合发展的双重背景下,高温对城镇与乡村居民健康及社会经济的消极影响愈演愈烈。科学评估城乡高温脆弱性并对比其差异,有利于为城乡地区的气候适应性策略提供差异性指引。在城乡差异视角下,以中国武汉都市发展区为例,整合多源数据测度城乡社区高温暴露度、敏感性、适应性因子,评估城乡社区高温脆弱性空间分布与集聚特征差异,识别并比较不同高温致脆因子类型,以此提出针对城乡社区的差异性防范策略。结果表明:(1)城镇与乡村社区的高温脆弱性在空间上呈现差异性分布格局,城镇社区表征为由内向外逐渐减弱的"核心外围"结构,乡村社区表征为整体低值、局部高值的"多极"结构。相对乡村而言,城镇较高、高等级高温脆弱性社区数量更多、分布更广、覆盖范围更大,面临的高温脆弱性问题也更严峻。(2)城镇与乡村社区的莫兰指数分别为0.693、0.471,表明城镇与乡村社区的高温脆弱性均具有显著的空间集聚性,且城镇高温脆弱性的空间集聚效应较乡村社区更强,但乡村社区面临的高温脆弱性挑战不可忽视。(3)引发城镇与乡村社区高温脆弱性的主导因子存在差异。城镇社区的高温脆弱性主要由高温暴露导致,乡村社区的高温脆弱性主要归结于其适应能力不足。在应对高温脆弱性时,城镇与乡村社区应当采取差异性的防范策略。

关键词:高温脆弱性;城乡差异;空间自相关;主导因子分区;武汉都市发展区

中图分类号:P208 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-01-01

DOI:10.13203/j.whugis20230450 **文章编号**:1671-8860(2025)04-0802-12

Comparative of Urban and Rural High Temperature Vulnerability Assessment in Wuhan Metropolis Based on Multi-source Data

FANG Yunhao[1,2] *ZHANG Wei*[3] *YUAN Nana*[4] *DING Wei*[1,2]

1 School of Architecture and Urban Planning, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China
2 Hubei Engineering and Technology Research Center of Urbanization, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China
3 The Architectural Design & Research Institute of Zhejiang University Co. Ltd, Hangzhou 310028, China
4 Hangzhou Jinghe Planning and Design Institute Co. Ltd, Hangzhou 311100, China

Abstract: **Objectives**: Within the context of global warming and urban-rural integration, the adverse effects of elevated temperatures on the health and socio-economic well-being of urban and rural populations are progressively escalating. A scientific assessment of high temperature vulnerability in both urban and rural areas, along with a comparison of their distinctions, can facilitate the development of tailored guidance for climate adaptation strategies. **Methods**: First, using Wuhan metropolis as a case study, we integrated multi-source data to gauge the exposure, sensitivity, and adaptation factors related to high temperatures in urban and rural communities. Second, we assessed the differences in the spatial patterns and clustering characteristics of high temperature vulnerability between urban and rural communities. Finally, various types of

基金项目:中央高校基本科研业务费资助(2022JYCXJJ065)。

第一作者:方云皓,博士,主要研究方向为城市风热环境。1198321182@qq.com

heat-induced vulnerability factors were identified, and heat prevention strategies were proposed for urban and rural communities, respectively. **Results:** (1) The high temperature vulnerability of urban-rural communities exhibits a differentiated spatial distribution pattern. Urban areas display a "core-periphery" structure characterized by a gradual decrease in vulnerability from the center outward. In contrast, rural areas exhibit a "multi-pole" structure with generally low vulnerability values and localized high values. In urban areas, communities with higher and sub-higher levels of high temperature vulnerability are more numerous, widely distributed, and have greater coverage compared to their rural counterparts. Consequently, urban areas face more severe challenges related to high-temperature vulnerability than rural areas. (2) The Moran's I indices for urban and rural communities are 0.693 and 0.471, respectively, signifying a noteworthy spatial clustering of high-temperature vulnerability in both urban and rural contexts. Moreover, the spatial clustering effect of high-temperature vulnerability in urban communities surpasses that observed in rural areas. Additionally, the challenge of high temperature vulnerability faced by rural communities cannot be disregarded. (3)There exists heterogeneity in the primary factors contributing to high temperature vulnerability between urban-rural communities. In urban settings, this vulnerability predominantly stems from heightened temperature exposure, while in rural areas, it is chiefly attributed to a lack of adaptive capacity. **Conclusions:** These findings imply that distinct preventive strategies should be employed by urban-rural communities to address high temperature vulnerability effectively.

Key words: high temperature vulnerability; urban-rural differences; spatial autocorrelation; dominant factor zoning; Wuhan metropolis

联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change,IPCC)第六次评估报告第一工作组报告指出,相较工业化前水平(1850—1900年),2010—2019年人类活动引起的全球平均表面温度升高约为1.07 ℃。2021年度《中国气候公报》发布,公报显示2021年全国年平均气温10.5 ℃,比常年偏高1.0 ℃,为1951年以来最暖年,江苏、湖北、浙江等11省年平均气温均创历史新高。高温热浪具有发生概率高、影响范围广、风险危害大等特征,不仅改变了城市下垫面的生态环境,如植被生长、空气质量、水文循环等,还间接影响了城乡居民的生产空间、生活行为、能源消耗等[1]。此外,持续的高温天气对城乡居民的健康水平也造成了威胁,易引发人群发病率和死亡率的增加[2]。例如,2022年5月30日至9月4日期间,席卷欧洲的热浪事件导致共计61 672人死亡[3]。因此,面对日益严重的极端高温天气事件,如何评估其灾害风险后果并降低其脆弱性已成为政府、学者以及公众等社会各界密切关注的重要议题。

高温脆弱性是指因受高温影响或无法对抗高温危害时的易损程度、倾向和趋势,由一系列自然、社会、经济因素及其相互作用决定,反映人类社会经济系统在预测、应对、抵御高温灾害时的属性[4-5]。评估高温脆弱性能够有效刻画脆弱人群特征并揭示不同区域高温脆弱程度差异。目前,针对高温脆弱性的评估研究涵盖两个方面:(1)基于高温灾害本身展开评估,强调高温对个体健康的病理学影响,通过高温灾害强度、影响范围、发生频率以及持续时间的系统性研判来评估高温灾害的潜在健康风险,包括个体的健康温度阈值区间[6]、高温致死率与个体生理状况的关联[7],常用的方法包括基于历史记录数据的数值统计法、专家经验法等。然而,该类型评估研究较多侧重高温自身的客观暴露属性,对于人群的主观适应能力考虑欠缺[8-9]。愈来愈多的研究证明,高温脆弱性不仅与极端事件、气象因素有关,也与社会群体的敏感性以及城市建成环境的整体适应性有密不可分的关联[10-12]。尤其对于城镇化进程不断加快的区域来说,其自身的抵抗力对于减缓、适应高温风险更为重要。(2)基于IPCC框架展开脆弱性评估,以地理空间格局分析方法为基础,通过将暴露度、敏感性及适应性作为3个基本维度来构建脆弱性评价指标体系,能够定量表征区域高温脆弱性的时空分布状况。一般包含3个步骤[13],即评估因子的筛选、评估因子量化方法的确定、综合评价模型或指标融合模型的构建,常用的方法包括主成分分析法、层次分析法、熵权法、德尔菲法。综上,基于高温灾害本身的评估研究与基于IPCC的高温脆弱性评估研究各有侧重。在尺度选取上,前者一般局限于人体[14]、建筑[15]等微观尺度,而后者一般适用于

市(县)域[16-17]、区域[18-19]、省域[20]、城市群[21]、国家[11]等宏观尺度。在指标选取上,前者往往仅涉及暴露度指标,后者则涵盖暴露度、敏感性及适应性3种维度指标,相对于前者在类型上更为丰富,评估结果也更加合理科学、客观公正。此外,RS与GIS的发展也为基于IPCC的高温脆弱性评估研究提供了技术支撑,致使其能够获取连续的地表信息,为更精细空间尺度的高温脆弱性评估提供途径。因此,基于IPCC的评估框架逐渐成为高温脆弱性评估研究的首选范式。

尽管基于IPCC的高温脆弱性评估研究已取得较为丰硕的成果,但其较多停留在城市(县)及以上尺度,对于街道、社区尺度的研究较少。此外,过往的研究对象过多集中于城市,对于乡村的高温脆弱性关注明显不足。有充分证据表明,高温热浪带来的风险能够威胁到乡村地区[22-23],尤其是对于大城市周边区域的乡村来说,特殊的地理区位导致其易受高温热浪的威胁。城乡地区的人口密度、基础设施建设、社会结构和资源分布存在差异,导致城乡人群在面对高温风险的敏感程度、适应能力也不同。研究城乡高温脆弱性差异,不仅有助于解析城乡地区高温脆弱性的差异性空间格局特征,揭示影响不同地区高温脆弱性的主导因子,还能够为资源的优化配置提供指导,确保公平合理地分配社会保障和防灾救灾资源,有利于为改善城乡热环境、减轻高温灾害的社会影响提供实践参考。

因此,本文以武汉都市发展区为例,基于城乡差异视角对城镇与乡村社区的高温脆弱性进行评估,揭示城乡社区的高温脆弱性格局,识别并比较致脆主导因子,以此分别建立城乡不同类型高温脆弱性分区并提出差异化防范策略,以期为城乡高温缓解政策提供精细化空间指引。

1 研究区域概况

武汉市是中国湖北省省会,地处江汉平原东部、长江中游,是中部地区中心城市与长江经济带核心城市,具有中部地区典型大城市的城镇化发展特征。武汉都市发展区[24]以武汉市外环高速公路附近的乡、镇行政边界为基本界线,总面积约为3 261 km^2,约占整个武汉市域范围面积的37%,其中城市建设用地面积约为871.99 km^2,是武汉城市功能的主要集聚区和城市空间的重点拓展区,其内部生产生活职能能够辐射整个武汉市及中部地区。伴随城镇化的快速推进,武汉都市发展区下垫面生态空间不断受建设用地侵占的同时夏季热岛效应现象频发,高温热浪对城乡居民的健康威胁已成为阻碍武汉都市发展区高质量、可持续发展的重要因素。综上,本文选取武汉都市发展区为研究区域(图1),共计1 897个社区单元。研究区域图基于湖北省自然资源厅标准地图(审图号:鄂S(2021)002号)绘制,行政界线无修改。

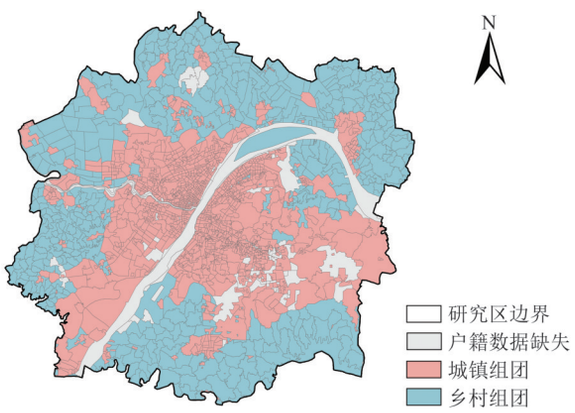


图1 研究区域

Fig. 1 The Study Area

2 研究数据与方法

2.1 研究数据及预处理

本文的研究数据主要包括:(1)地表温度数据,主要用于高温暴露度评估。其来源于地理空间数据云网站(https://www.gscloud.cn/)提供的陆地卫星(Landsat)8操作陆地成像仪(operational land imager,OLI)/热红外传感器(thermal infrared sensor,TIRS)数据集,空间分辨率为30 m,时间分辨率为2020—2021年夏季4个时段(具体为2020年6月16日、2020年7月2日、2021年7月21日、2021年8月6日),所选时间段含云量较少、静风、无降雨、大气可见度高且存在高温(当天最高气温≥35 ℃)。(2)社区尺度人口数据,主要用于高温敏感性评估。其来源于武汉市自然资源和规划局(http://zrzyhgh.wuhan.gov.cn/),包含各社区人口总数、密度、性别、年龄、户籍地(城镇或乡村)等属性。本文依据社区内部人口户籍属性识别并划分城镇与乡村两种类型社区,其中城镇社区1 244个,乡村社区552个,部分社区(101个)由于户籍人口数据缺失不纳入统计(图1)。(3)绿地水体数据、兴趣点(point of interest, POI)数据、二手房价格数据,主要用于高温适应性评估。其中,绿地水体数据来源于武汉市自然资源和规划局提供的土地利用矢量数据集;POI数据来源于

高德地图开放平台(http://www.amap.com/),依据相关文献[12],筛选医疗设施与纳凉设施作为高温适应场所,其可依据高德数据分类体系直接爬取,医疗设施由药店、诊所、综合医院组成,纳凉设施由风景名胜、地铁站、购物服务设施、体育休闲服务设施、公园广场和公共建筑(图书馆、博物馆等)组成;二手房价格数据来源于安居客网站(https://wuhan.anjuke.com/)。特别说明的是,本文利用ENVI 5.3软件对已采集的Landsat 8 OLI/TIRS数据进行辐射定标、大气校正、几何校正等操作,利用ArcGIS Pro 3.0软件对人口数据、绿地水体数据、POI数据、二手房价格数据进行异常值去除、坐标纠偏(统一为GCS_WGS_1984)、投影、裁剪等操作,在此基础上以1 897个社区为空间统计单元利用上述预处理后的数据构建指标评估因子。

2.2　研究方法

IPCC第六轮评估报告强调气候脆弱性评估对于城乡可持续发展具有重要意义。本文在IPCC框架基础上,以城乡二元结构下的高温脆弱性差异作为评估目标并提出分析框架,如图2所示。首先,基于暴露度、敏感性与适应性因子及其权重,构建城镇与乡村社区高温脆弱性评估函数模型;其次,比较城镇与乡村社区高温脆弱性的空间分布与集聚特征差异;最后,识别并比较城镇与乡村社区高温致脆类型,依据不同主导因子提出城乡差异化高温脆弱性防范策略。

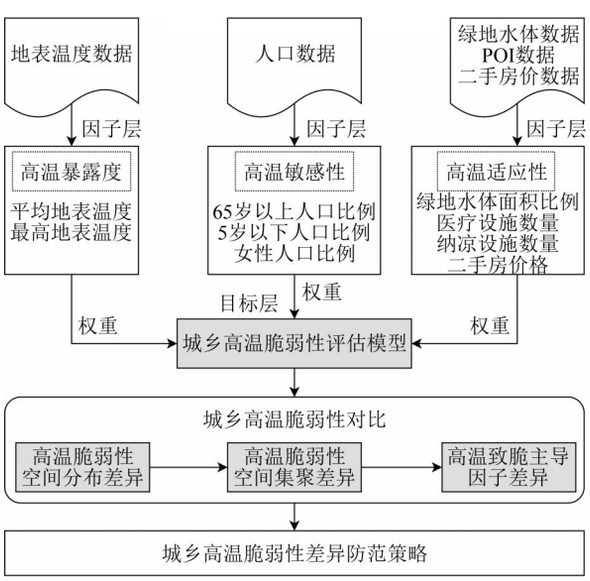


图2　城乡高温脆弱性分析框架

Fig. 2　Analytical Framework of Urban-Rural High Temperature Vulnerability

2.2.1　高温暴露度评估

高温暴露度反映高温热浪的严重程度,其与下垫面热环境的分布情况有关。地表温度是衡量下垫面热环境最重要的指标之一,平均地表温度与最高地表温度分别反映夏季高温整体暴露与极端暴露情况,其数值越高的区域,人群暴露于热环境危险源的概率越大,对城乡居民健康造成威胁的程度越高[21,25]。本文选取城乡社区单元内的平均地表温度与最高地表温度指标表征暴露度因子。基于Landsat 8 OLI/TIRS遥感切片数据与ENVI 5.3软件,对2020—2021年夏季4个时段的武汉都市发展区的地表温度进行反演。具体计算过程如下[26]。

首先,计算热辐射强度L_λ:

$$L_\lambda=\left[\varepsilon B(T_s)+(1-\varepsilon)L_\downarrow\right]\tau+L_\uparrow \quad (1)$$

式中,ε为地表比辐射率;$B(T_s)$为黑体热辐射亮度;T_s为地表真实温度(K);τ为大气在热红外波段的透过率;$L_\uparrow$为大气向上辐射亮度;$L_\downarrow$为大气向下辐射亮度;τ、$L_\uparrow$与$L_\downarrow$均可通过NASA官网查询(https://atmcorr.Gsfc.nasa.gov/)。

其次,根据Planck反函数获取T_s:

$$T_s=K_2/\ln\left[1+K_1/B(T_s)\right] \quad (2)$$

式中,K_1和K_2为热红外波段的定标常数,可通过查看遥感切片数据中的MTL文件获取。对于波段10而言,K_1=774.89 W/(m²·sr·μm),K_2=1 321.08 K。

最后,利用ArcGIS Pro 3.0软件对城乡社区单元内平均地表温度与最高地表温度进行空间统计,并将热力学地表温度T_s转换为摄氏地表温度T(单位为℃)。

2.2.2　高温敏感性评估

高温敏感性反映城乡区域内部受到高温热浪潜在影响时,人群能够承受胁迫的最大程度,其与人口的自身结构特征有关。不同人群身体素质及经济状况的异质性导致其面临高温热浪灾害时的应激程度出现差异,尤其是对于老年人、儿童以及女性等群体来说,其身体调节机能相对较弱、免疫能力相对较低且患基础病概率高,在同等程度的高温环境下受到的伤害更大,是易受高温影响的敏感性群体[8-9,27]。本文分别选取城乡社区单元内老年人(65岁以上)、儿童(5岁以下)和女性人口比例指标表征敏感性因子。

2.2.3　高温适应性评估

高温适应性反映城乡系统内部结构减缓、防范高温热浪的能力,其与人口的居住环境、资源禀赋、收入水平等密切相关。植被绿地、河流湖泊等蓝绿空间已被证明是缓解城乡高温热浪的

重要载体[28];医疗设施数量表征城乡居民健康受到高温伤害时主动进行治疗和就医的可达性水平[29];纳凉设施数量反映区域空间提供降温减灾、健康保障设施的能力[30];家庭收入水平决定居民拥有降温设施(例如空调)的数量、使用频率以及使用时间,影响居民的高温适应行为选择。高精度的家庭收入水平数据较难直接获取,可通过二手房房价数据间接替代,二手房房价作为映射购房群体经济实力的关键因素,在一定程度上反映不同居住人群收入水平空间分异[12]。本文分别选取城乡社区单元内绿地水体面积比例、医疗设施数量、纳凉设施数量以及二手房价格指标表征适应性因子。

2.2.4 高温脆弱性评估

高温脆弱性由综合性函数模型构建,反映城乡系统受高温热浪的危害程度、对高温变化的敏感程度和自身的适应能力(表1),其具体计算过程如下。

表1 高温脆弱性评估指标及权重

Table 1 Indicators and Weights for Assessing High Temperature Vulnerability

目标层	因子层	指标层	第一主成分载荷	第二主成分载荷	第三主成分载荷	指标权重	作用方向
脆弱性	暴露度	平均地表温度/℃	0.871	−0.277	−0.313	0.087	正向
		最高地表温度/℃	0.850	−0.276	−0.323	0.083	
	敏感性	65岁以上人口比例/%	−0.125	0.388	−0.615	0.043	正向
		5岁以下人口比例/%	−0.339	−0.609	0.151	0.106	
		女性人口比例/%	0.250	0.707	−0.123	0.104	
	适应性	绿地水体面积比例/%	−0.776	0.178	0.173	0.096	负向
		医疗设施数量/个	0.592	0.159	0.408	0.159	
		纳凉设施数量/个	0.553	0.215	0.609	0.179	
		二手房价格/(元·m^{-2})	0.688	0.096	0.158	0.143	
主成分特征根			3.405	1.287	1.210		
主成分方差百分比/%			37.833	14.298	13.449		

首先,为了减少暴露度、敏感性与适应性因子及指标间量级和量纲的差异,在计算各指标之前采用极差标准化方法对初始数据进行归一化处理(图3)。其中,正向指标标准化公式为:

$$Y_{ij}=\left(X_{ij}-X_{j\min}\right)/\left(X_{j\max}-X_{j\min}\right) \tag{3}$$

式中,X_{ij}、$X_{j\max}$、$X_{j\min}$和Y_{ij}分别为社区单元i中第j指标的原始值、最大值、最小值和标准化值。负向指标标准化公式为:

$$Y_{ij}=\left(X_{j\max}-X_{ij}\right)/\left(X_{j\max}-X_{j\min}\right) \tag{4}$$

其次,利用加权综合评价法[31]分别计算暴露度、敏感性与适应性因子:

$$E_i=\sum_{j=1}^{2}Y_{ij}\times W_j \tag{5}$$

$$S_i=\sum_{j=1}^{3}Y_{ij}\times W_j \tag{6}$$

$$A_i=\sum_{j=1}^{4}Y_{ij}\times W_j \tag{7}$$

式中,E_i为社区单元i的暴露度因子;S_i为社区单元i的敏感性因子;A_i为社区单元i的适应性因子;W_j为第j指标的权重,由主成分分析[8]确定。主成分分析是一种常用的数据降维和权重特征提取方法,通过计算协方差矩阵可计算特征向量及其对应的特征值(一般为方差百分比),以此明确每个特征在主成分中的贡献程度,即权重。在进行主成分分析前需要对各标准化数值进行抽样适合性检验(Kaiser-Meyer-Olkin,KMO),本文中KMO为0.727,表明各指标间的相关性较强,适合进行主成分分析。

最后,采用乘除法计算高温脆弱性因子。高温脆弱性计算一般涵盖加减法与乘除法两种算法,相对于加减法,乘除法更易反映指标之间的耦合协同关系,并已成为高温脆弱性评估研究的主流趋势[5,32],其表达式为:

$$V_i=(E_i\times S_i)/A_i \tag{8}$$

式中,V_i为社区单元i的脆弱性因子。其中,E_i、S_i与V_i成正比,即暴露度、敏感性越高,脆弱性越高;A_i与V_i成反比,即适应性越强,脆弱性越低。

2.2.5 高温致脆主导因子提取

根据问题导向,本文选择亟需得到热缓解的区域(较高和高等级脆弱性社区)作为高温防范

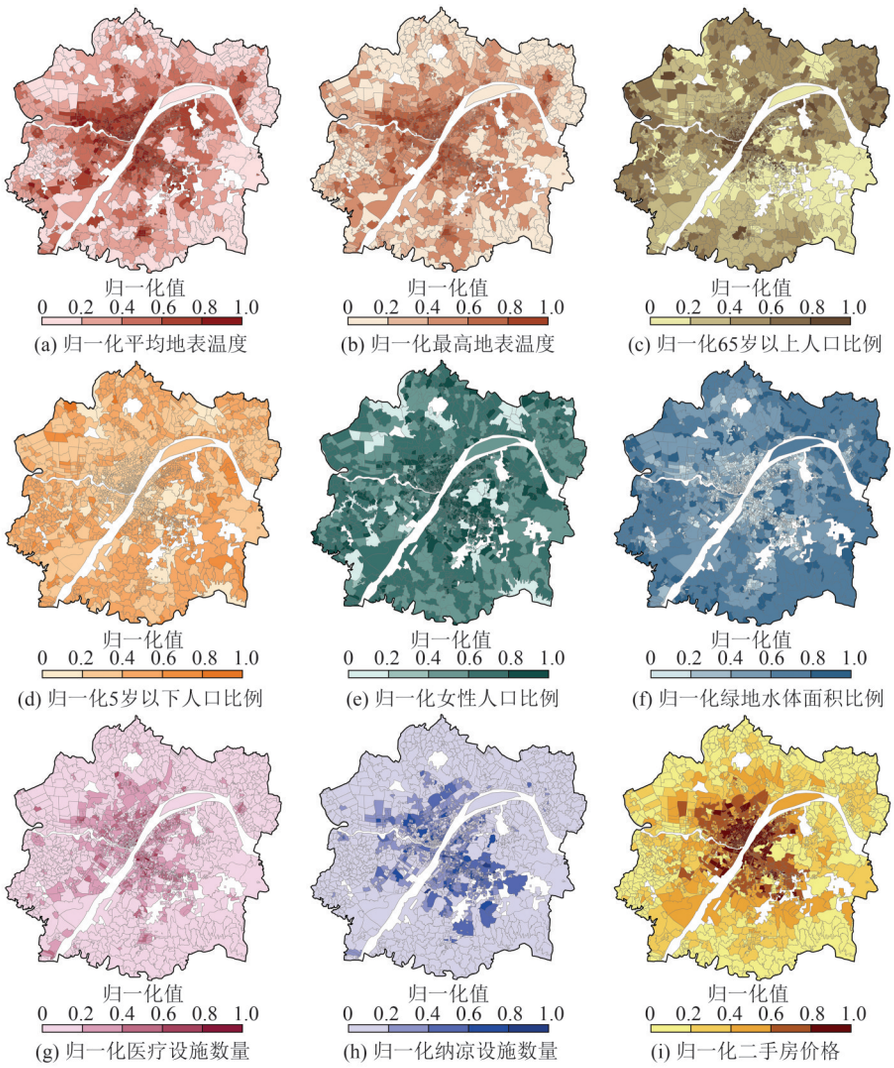


图 3　高温脆弱性评估指标空间分布

Fig. 3　Spatial Distribution of Indicators for Assessing High Temperature Vulnerability

分区对象。首先,利用自然断点法按由大到小的顺序将标准化后的暴露度因子、敏感性因子、适应性因子及脆弱性因子分别划分为低、较低、中等、较高和高 5 个等级,筛选较高和高等级脆弱性社区作为分区对象;其次,参照相关研究[11-12],根据暴露度、敏感性、适应性的等级差异对城乡社区单元的致脆因子进行归类,采用图层叠置方法将具有较高和高等级暴露度的社区单元划分为高温暴露主导型,将具有较高和高等级敏感性的社区单元划分为人口敏感主导型,将较低、低等级适应性且暴露度、敏感性均较低的社区单元划分为适应能力不足主导型,剩余社区单元基本属于中等暴露度、中等敏感性以及中等、较高、高适应性区域,将此类社区单元划分为综合主导型,并形成空间可视化地图;最后,根据致脆类型的差异性,比较引发城乡高温脆弱性的主导因子,分别针对城镇与乡村较高和高等级脆弱性社区提出差异性高温防范策略。

3　结果与分析

3.1　城乡社区高温脆弱性空间分布特征对比

如图 4 与图 5 所示,依次统计城镇与乡村社区高温暴露度、敏感性、适应性及脆弱性指数并予以空间可视化。结果显示,城镇高暴露度社区主要集中在中部三环线以内的老城区(江汉区、江岸区、汉阳区、武昌区等),低暴露度社区主要分布在蔡甸区与洪山区。乡村高暴露度社区主要集中在青山区、蔡甸区以及东西湖区,低暴露度社区主要分布在黄陂区、新洲区以及江夏区。城镇高敏感性社区主要集中在洪山区、武昌区,低敏感性社区主要分布在江夏区。乡村高敏感性社区主要集中在蔡甸区、东西湖区与黄陂区,低敏感性社区主要分布在江夏区。城镇高适应

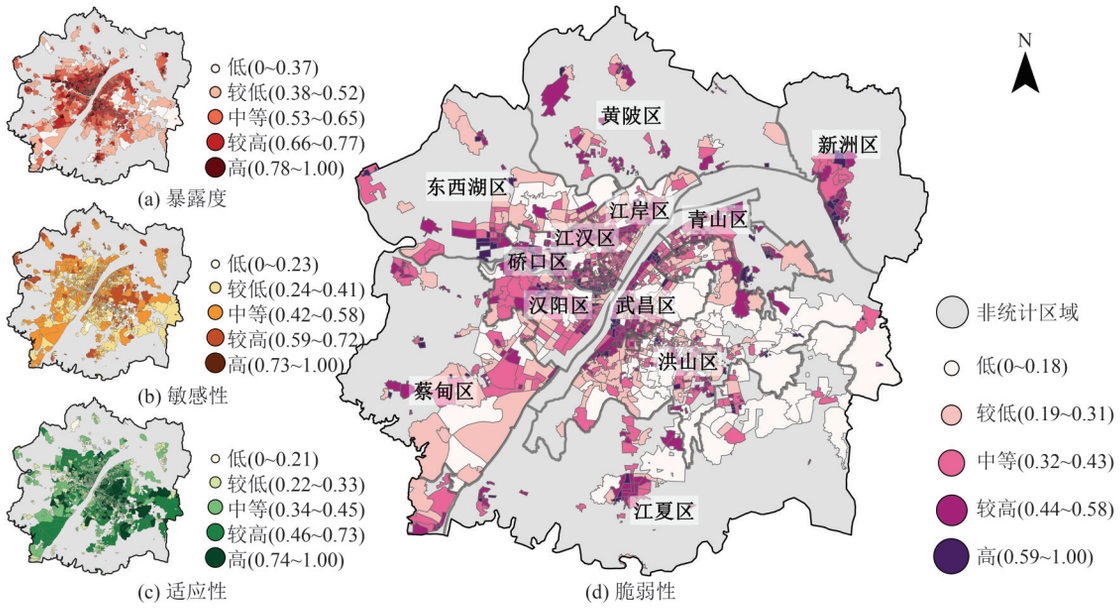


图4 城镇社区高温脆弱性空间分布

Fig. 4 Spatial Distribution of High Temperature Vulnerability in Urban Communities

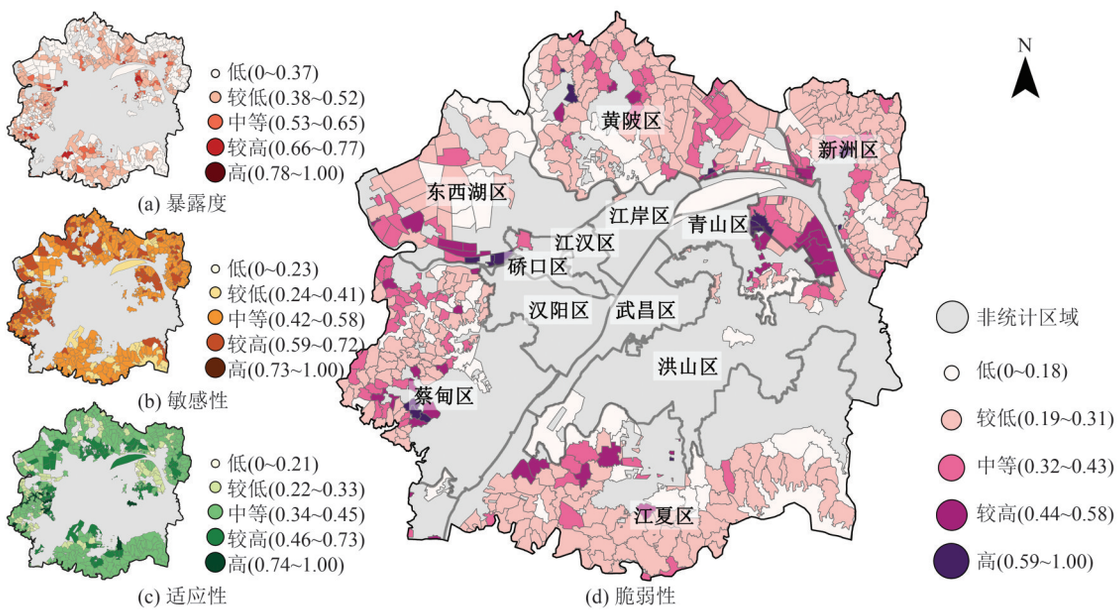


图5 乡村社区高温脆弱性空间分布

Fig. 5 Spatial Distribution of High Temperature Vulnerability in Rural Communities

性社区主要集中在洪山区、江夏区,低适应性社区主要分布在中部老城区。乡村高适应性社区主要集中在蔡甸区,低适应性社区主要分布在黄陂区与洪山区。

城镇高脆弱性社区主要呈片状集聚在三环线以内的中部老城区,此类区域大多为各类功能用地,下垫面由硬质铺砖组成,建设密度较大,开发强度较高,人口较为密集;低脆弱性社区主要集聚在江夏区与洪山区,此类区域大多由林地和湖泊组成,生态承载力较高。乡村高脆弱性社区主要呈斑块状集聚在青山区、东西湖区以及蔡甸区,此区域包含大量汽车、钢铁等大型工业设施,由其排放的热量、污染物对局部热环境产生显著影响;低脆弱性社区分散在江夏区、黄陂区与新洲区,分布范围较广,此区域存在大量植被水域等蓝绿空间,开发强度较低,人口较为稀疏。

综上,城镇社区与乡村社区的高温脆弱性在空间上呈现差异性分布格局。城镇社区表征为由内向外逐渐减弱的“核心外围”结构,乡村社区表征为整体低值、局部高值的“多极”结构。相对乡村而言,城镇较高、高等级高温脆弱性社区数量更多、分布更广、覆盖范围更大。

3.2　城乡社区高温脆弱性空间集聚特征对比

本文分别利用莫兰指数(Moran's I)与局部空间关联指标(local indicators of spatial association,LISA)聚类分别探测城乡社区高温脆弱性的全局空间自相关特征以及局部空间自相关特征,如图 6 所示。

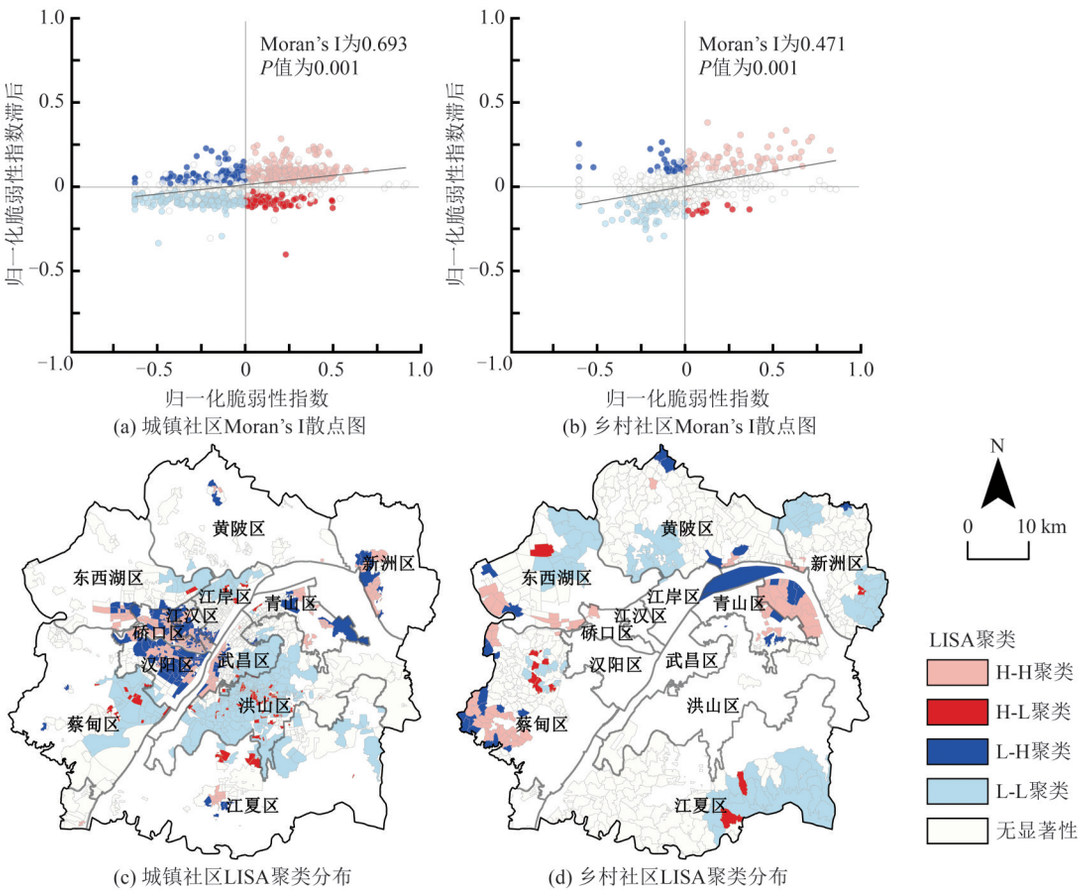


图 6　城乡社区高温脆弱性空间自相关分布

Fig. 6　Spatial Autocorrelation Distribution of High Temperature Vulnerability in Urban-Rural Communities

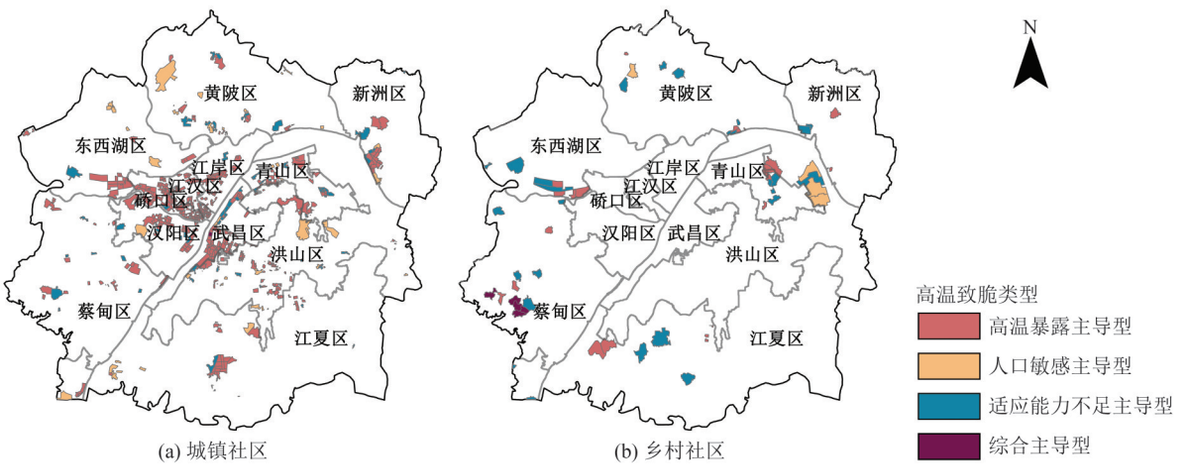
由图 6(a)、6(b)可知,城镇与乡村社区的 Moran's I 分别为 0.693(P 值为 0.001)、0.471(P 值为 0.001),表明城镇与乡村社区的高温脆弱性均具有空间集聚特征,呈现显著的空间正相关性,同时也侧面反映乡村社区的高温脆弱性问题不可忽视,若不加以管控,高脆弱性比例会由于集聚效应进一步增加。主要原因有两点:(1)下垫面地表温度自身存在热传导性与空间集聚性,本文选取的乡村社区属于大城市周边近郊区域,与偏远乡村不同,其也会受到城镇社区高温热浪的"牵连";(2)近郊区域的乡村社区易受城镇化溢出效应的影响,表征为城镇不透水表面的延伸扩张、产业功能(工厂等)嫁接转移等,由此导致的蓝绿空间减少及热量逐渐排放会引发高温脆弱性升高。此外,城镇社区的 Moran's I 指数高于乡村社区,表明城镇社区高温脆弱性的空间集聚性较乡村社区更强。这主要是由于城镇与乡村在人口密度、建筑体量、交通与工业排放等方面的差异所致,城镇社区的建成环境基底决定其相对于乡村社区更易引发热量集聚、人口与基础设施集中等现象,由此导致其高温脆弱性更易聚集分布。

由图 6(c)、6(d)可知,城镇与乡村社区的 LISA 聚类在空间上存在差异性,城镇社区的高-高(high-high,H-H)聚类、低-低(low-low,L-L)聚类较多,H-H 聚类呈斑块状主要分布在江汉区、硚口区、汉阳区、青山区,L-L 聚类呈片状主要集聚在洪山区、蔡甸区;乡村社区的 H-H 聚类、L-L 聚类较少,H-H 聚类零散分布在洪山区、蔡甸区、东西湖区,L-L 聚类主要集聚在新洲区、黄陂区、江夏区。

3.3　城乡社区高温致脆主导因子对比

本文对武汉都市发展区城镇与乡村社区高温致脆类型进行划分,并统计不同类型社区单元数量及其所占比例。从空间分布来看(图 7),城镇与乡村社区高温致脆类型均可分为 4 种。城镇高温暴露主导型社区主要集聚在中部老城区,人

口敏感主导型社区与适应能力不足主导型社区较少,零散分布在各区,综合主导型社区仅有1处,分布在武昌区;乡村高温暴露主导型社区主要呈斑块状分布在青山区、蔡甸区、东西湖区以及江夏区,人口敏感主导型社区主要分布在黄陂区、洪山区,适应能力不足主导型社区呈零散状分布在各区,综合主导型社区仅有5处,集中在蔡甸区。



(a) 城镇社区 (b) 乡村社区

图7 城乡社区高温致脆类型分区

Fig. 7 Classification of High Temperature-Induced Vulnerability in Urban-Rural Communities

由图8可知,城镇高温较高/高脆弱性社区数量(573个)显著高于乡村(74个)。城镇高温致脆因子比例依次为高温暴露主导型(81.3%)>适应能力不足主导型(12.2%)>人口敏感主导型(6.3%)>综合主导型(0.2%)。其中,高温暴露主导型社区数量最多(466个),其次为适应能力不足主导型社区(70个),人口敏感主导型与综合主导型社区数量分别为36个、1个;乡村致脆因子比例依次为适应能力不足主导型(47.3%)>高温暴露主导型(31.1%)>人口敏感主导型(14.9%)>综合主导型(6.7%)。其中,适应能力不足主导型社区数量最多(35个),其次为高温暴露主导型社区(23个),人口敏感主导型与综合主导型社区数量分别为11个、5个。

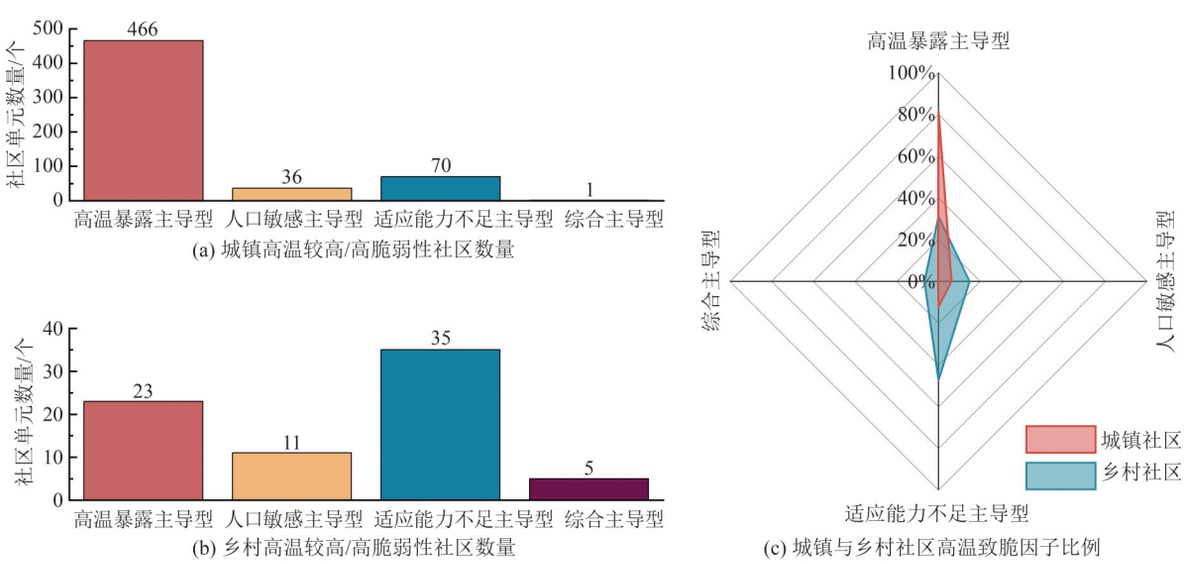


图8 城乡社区高温致脆类型统计

Fig. 8 Statistics on the Types of High Temperature-Induced Vulnerability in Urban-Rural Communities

综上,引发城镇社区与乡村社区高温脆弱性的主导因子不同。城镇社区的高温脆弱性主要由高温暴露导致,下垫面热量的集聚是引发城镇社区高温脆弱性的关键因素;乡村社区的高温脆弱性主要归结于其适应能力不足,尽管乡村社区相对于城镇社区拥有较丰富的蓝绿空间资源,但避暑、纳凉、医疗等基础功能设施较少,整体高温适应性仍不足以抵抗、缓解高温热浪的风险。

4　结论与启示

4.1　结论

本文以武汉都市发展区为例,基于多源数据测度城镇与乡村社区的高温暴露度、敏感性、适应性,结合3种因子评估并比较城乡社区高温脆弱性空间分布与集聚特征差异,分别识别城乡社区高温致脆类型并解析致脆主导因子,以此提出城乡社区差异性防范策略。其主要结论如下:

1)城镇与乡村社区的高温脆弱性在空间上呈现差异性分布格局。城镇社区表征为由内向外逐渐减弱的“核心外围”结构,乡村社区表征为整体低值、局部高值的“多极”结构。城镇高温高脆弱性社区主要集聚在三环线内开发强度较高、人口较为密集的老城区;乡村高温高脆弱性社区主要分布在三环线外工业设施区域。相对乡村而言,城镇高等级高温脆弱性社区数量更多、分布更广、覆盖范围更大,由此面临的高温脆弱性问题也更严峻。

2)城镇与乡村社区的Moran's I分别为0.693、0.471,表明城镇与乡村社区的高温脆弱性均具有显著的空间正相关性,且城镇社区高温脆弱性的空间集聚性较乡村社区更强。但同时也说明乡村社区的高温脆弱性问题不可忽视,若不加以管控,高脆弱性比例会由于集聚效应进一步增加。

3)引发城镇与乡村社区高温脆弱性的主导因子存在差异。城镇社区的高温脆弱性主要由高温暴露导致,乡村社区的高温脆弱性主要归结于其适应能力不足。在应对高温脆弱性时,城镇社区与乡村社区采取的防范策略应当有所侧重。

4.2　启示

基于高温致脆因子类型的差异性表征,城镇与乡村社区在应对高温脆弱性时采取的防范策略应当有所侧重。

城镇社区应当采取基于“缓解高温暴露”为目标的防范策略:(1)补充气象监测设备,完善监测系统,实时监测各城镇社区温度和气候变化,以全方位预警高温天气,及时传达高温预警信息,减少高温期间不必要的外出;(2)城镇高温暴露主导型社区主要集聚在三环线内老城区及三环线外工业区。老城区内建筑密度较高,开发强度较大,人口密度较高,可通过增加植被和绿地空间(如增加行道树和屋顶绿化)、调整植被类型与种植位置、改善建筑设计建构通风系统来降低区域温度。工业区废气、热量排放较多,可通过采取相关环境规制、减排创新技术、加强能源管理来加以限制和管控。(3)向城镇居民推广节能环保措施,适当减少高适应性行为(如空调的频繁使用)以脱离高温恶性循环状态。

乡村社区应当采取以提升高温适应能力为目标的防范策略:(1)乡村适应能力不足主导型社区主要分布在三环线外,交通便利度较低,能够提供纳凉避暑属性的基础设施较少且分布不均匀,可通过最低成本路径与缓冲区相结合的方式在公共场所建立避暑设施,如遮阳棚、喷水装置等,为乡民提供清凉和休息的场所;(2)建立紧急救助体系及时响应高温天气对乡民和农作物的影响,并提供紧急救助和物资支持,如空调设备、清凉食品、防暑药物等。同时,定期针对老年人、婴幼儿以及慢性疾病患者等群体开展身体检查,帮助其增强自身热调节能力;(3)加强高温脆弱性宣传与教育,组织培训,提高乡民对高温脆弱性的认识,采取合适的防范措施,如避免在炎热时段外出,适当增加水分摄入等。

本文有利于为中国城乡融合背景下更加精细化的气候适应性政策提供支撑依据。然而,囿于数据采集可获得性限制,高温脆弱性指标的选取工作(例如受高温影响的人口健康疾病数据)仍需完善,尤其面对城乡不同区域时,丰富相关指标体系框架仍是一项动态、复杂的基础性研究,因此,后续将在条件允许情况下,与公共健康、疾病防控等学科展开跨领域合作,进一步结合相关数据完善结论。

参　考　文　献

[1] HE C, ZHOU L G, YAO Y R, et al. Estimating Spatial Effects of Anthropogenic Heat Emissions Upon the Urban Thermal Environment in an Urban Agglomeration Area in East China[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 57: 102046.

[2] LAI D Y, LIU W Y, GAN T T, et al. A Review of Mitigating Strategies to Improve the Thermal Environment and Thermal Comfort in Urban Outdoor Spaces [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 661: 337-353.

[3] BALLESTER J, QUIJAL-ZAMORANO M, MÉNDEZ-TURRUBIATES R F, et al. Heat-Related Mortality in Europe During the Summer of 2022[J]. *Nature Medicine*, 2023, 29(7): 1857-1866.

[4] IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis.

Working Group II Contribution to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

[5] 谢盼, 王仰麟, 彭建, 等. 基于居民健康的城市高温热浪灾害脆弱性评价: 研究进展与框架[J]. 地理科学进展, 2015, 34(2): 165-174.
XIE Pan, WANG Yanglin, PENG Jian, et al. Health Related Urban Heat Wave Vulnerability Assessment: Research Progress and Framework[J]. *Progress in Geography*, 2015, 34(2): 165-174.

[6] KOTHARKAR R, GHOSH A. Progress in Extreme Heat Management and Warning Systems: A Systematic Review of Heat-Health Action Plans (1995—2020)[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 76: 103487.

[7] LIU J W, VARGHESE B M, HANSEN A, et al. Heat Exposure and Cardiovascular Health Outcomes: A Systematic Review and Meta-Analysis[J]. *The Lancet Planetary Health*, 2022, 6(6): e484-e495.

[8] 谢盼, 王仰麟, 刘焱序, 等. 基于社会脆弱性的中国高温灾害人群健康风险评价[J]. 地理学报, 2015, 70(7): 1041-1051.
XIE Pan, WANG Yanglin, LIU Yanxu, et al. Incorporating Social Vulnerability to Assess Population Health Risk Due to Heat Stress in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(7): 1041-1051.

[9] 薛倩, 谢苗苗, 郭强, 等. 地理学视角下城市高温热浪脆弱性评估研究进展[J]. 地理科学进展, 2020, 39(4): 685-694.
XUE Qian, XIE Miaomiao, GUO Qiang, et al. Research Progress on Urban Heat Wave Vulnerability Assessment: A Geographical Perspective[J]. *Progress in Geography*, 2020, 39(4): 685-694.

[10] 杨红龙, 许吟隆, 陶生才, 等. 高温热浪脆弱性与适应性研究进展[J]. 科技导报, 2010, 28(19): 98-102.
YANG Honglong, XU Yinlong, TAO Shengcai, et al. Vulnerability to Heat Waves and Adaptation: A Summary[J]. *Science & Technology Review*, 2010, 28(19): 98-102.

[11] 黄晓军, 王博, 刘萌萌, 等. 中国城市高温特征及社会脆弱性评价[J]. 地理研究, 2020, 39(7): 1534-1547.
HUANG Xiaojun, WANG Bo, LIU Mengmeng, et al. Characteristics of Urban Extreme Heat and Assessment of Social Vulnerability in China[J]. *Geographical Research*, 2020, 39(7): 1534-1547.

[12] 黄晓军, 祁明月, 赵凯旭, 等. 高温影响下西安市人口脆弱性评估及其空间分异[J]. 地理研究, 2021, 40(6): 1684-1700.
HUANG Xiaojun, QI Mingyue, ZHAO Kaixu, et al. Assessment of Population Vulnerability to Heat Stress and Spatial Differentiation in Xi'an[J]. *Geographical Research*, 2021, 40(6): 1684-1700.

[13] 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.
WU Xilin, LIU Qingsheng, LIU Gaohuan, et al. Risk Assessment of Heat Waves: A Review[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2019, 21(7): 1029-1039.

[14] BLAIKIE P M. At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability, and Disasters[M]. London: Routledge, 1994.

[15] XU Z W, CROOKS J L, BLACK D, et al. Heatwave and Infants' Hospital Admissions Under Different Heatwave Definitions[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 229: 525-530.

[16] 陈恺, 唐燕. 城市高温热浪脆弱性空间识别与规划策略应对: 以北京中心城区为例[J]. 城市规划, 2019, 43(12): 37-44.
CHEN Kai, TANG Yan. Identification of Urban Areas Vulnerable to Heat Waves and Coping Strategies: A Case Study of Beijing Central City[J]. *City Planning Review*, 2019, 43(12): 37-44.

[17] 税伟, 陈志淳, 邓捷铭, 等. 耦合适应力的福州市高温脆弱性评估[J]. 地理学报, 2017, 72(5): 830-849.
SHUI Wei, CHEN Zhichun, DENG Jieming, et al. Evaluation of Urban High Temperature Vulnerability of Coupling Adaptability in Fuzhou, China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(5): 830-849.

[18] 代欣, 刘庆生, 武夕琳, 等. 印尼雅万高铁沿线区域高温热浪风险[J]. 热带地理, 2021, 41(1): 147-158.
DAI Xin, LIU Qingsheng, WU Xilin, et al. The Risk of Heat Wave Along the Jakarta-Bandung High-Speed Railway in Indonesia[J]. *Tropical Geography*, 2021, 41(1): 147-158.

[19] 陈金雨, 陶辉, 翟建青, 等. 中巴经济走廊极端高温事件风险评估[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(4): 65-74.
CHEN Jinyu, TAO Hui, ZHAI Jianqing, et al. Risk Assessment of Extreme High Temperature Events over the China-Pakistan Economic Corridor[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2022, 31(4): 65-74.

[20] 罗晓玲，杜尧东，郑璟. 广东高温热浪致人体健康风险区划[J]. 气候变化研究进展，2016，12(2)：139-146.
LUO Xiaoling，DU Yaodong，ZHENG Jing. Risk Regionalization of Human Health Caused by High Temperature & Heat Wave in Guangdong Province [J]. *Climate Change Research*，2016，12(2)：139-146.

[21] 付含聪，邓帆，杨欢，等. 基于遥感的长江中下游城市群高温热浪风险评估[J]. 长江流域资源与环境，2020，29(5)：1174-1182.
FU Hancong，DENG Fan，YANG Huan，et al. Assessing Heat Wave Risk of Urban Agglomeration in the Middle-Lower Yangtze River Based on Remote Sensing [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*，2020，29(5)：1174-1182.

[22] GABRIEL K M A，ENDLICHER W R. Urban and Rural Mortality Rates During Heat Waves in Berlin and Brandenburg，Germany[J]. *Environmental Pollution*，2011，159(8/9)：2044-2050.

[23] LÓPEZ-BUENO J A，NAVAS-MARTÍN M A，LINARES C，et al. Analysis of the Impact of Heat Waves on Daily Mortality in Urban and Rural Areas in Madrid[J]. *Environmental Research*，2021，195：110892.

[24] 黄亚平，冯艳，张毅，等. 武汉都市发展区簇群式空间成长过程、机理及规律研究[J]. 城市规划学刊，2011(5)：1-10.
HUANG Yaping，FENG Yan，ZHANG Yi，et al. A Research on Spatial Clusters in Wuhan Metropolitan Area：Growth Process，Mechanism and Developmental Characters[J]. *Urban Planning Forum*，2011(5)：1-10.

[25] 何苗，徐永明，李宁，等. 基于遥感的北京城市高温热浪风险评估[J]. 生态环境学报，2017，26(4)：635-642.
HE Miao，XU Yongming，LI Ning，et al. Assessing Heat Wave Risk in Beijing by Remote Sensing[J]. *Ecology and Environmental Sciences*，2017，26(4)：635-642.

[26] 胡德勇，乔琨，王兴玲，等. 利用单窗算法反演 Landsat 8 TIRS 数据地表温度[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2017，42(7)：869-876.
HU Deyong，QIAO Kun，WANG Xingling，et al. Comparison of Three Single-Window Algorithms for Retrieving Land-Surface Temperature with Landsat 8 TIRS Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*，2017，42(7)：869-876.

[27] LI J，XU X，YANG J，et al. Ambient High Temperature and Mortality in Jinan，China：A Study of Heat Thresholds and Vulnerable Populations[J]. *Environmental Research*，2017，156：657-664.

[28] 卢阳，杨建思，黄昕，等. 面向局部气候带的城市形态对地表温度的影响[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2021，46(9)：1412-1422.
LU Yang，YANG Jiansi，HUANG Xin，et al. Effects of Urban Morphology on Land Surface Temperature in Local Climate Zones[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*，2021，46(9)：1412-1422.

[29] 王丹舟，张强，朱秀迪，等. 基于多源数据的上海市高温热浪风险评估[J]. 北京师范大学学报(自然科学版)，2021，57(5)：613-623.
WANG Danzhou，ZHANG Qiang，ZHU Xiudi，et al. Multisource Data Evaluation of Heat Risk in Shanghai[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*，2021，57(5)：613-623.

[30] 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.
YANG Linchuan，YANG Haosen，FAN Qiangxue，et al. Vulnerability Assessment and Planning Response to High-Temperature Wave in Large Cities：The Case of Chengdu[J]. *Planners*，2023，39(2)：38-45.

[31] 郑雪梅，王怡，吴小影，等. 近20年福建省沿海与内陆城市高温热浪脆弱性比较[J]. 地理科学进展，2016，35(10)：1197-1205.
ZHENG Xuemei，WANG Yi，WU Xiaoying，et al. Comparison of Heat Wave Vulnerability Between Coastal and Inland Cities of Fujian Province in the Past 20 Years[J]. *Progress in Geography*，2016，35(10)：1197-1205.

[32] EBERT U，WELSCH H. Meaningful Environmental Indices：A Social Choice Approach[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*，2004，47(2)：270-283.