

气候变化视角下城市街道可步行性 与热风险的耦合研究 ——以合肥市为例

顾康康^{1,2}, 冉桃滔¹, 黄水明¹, 洪伟¹

(1. 安徽建筑大学建筑与规划学院, 安徽合肥 230601;
2. 安徽省国土空间规划与生态研究院, 安徽合肥 230601)

摘要:气候变化背景下,片面强调提高街道步行性会忽视高温对人体健康的影响。本研究以合肥市为例,基于步行指数和“危害-暴露-脆弱”风险评估框架评价街道步行热风险,并通过耦合步行性和热风险划分街道类型。结果表明:合肥市步行性整体良好,呈“多点集中、内强外弱”的空间格局,但步行面临高温危害。合肥市中高热风险街道比例较低,但整体抗风险能力较弱,街道易随人口增长、老龄化加剧和极端气温增强而转换为高热风险性街道。合肥市街道步行风险类型呈现圈层分布,主要受到暴露性和脆弱性水平的影响。预警街道和潜在风险街道的影响强度比友好型街道更高。

关键词:气候变化;高温热浪;步行性;热风险;步行风险

中图分类号: TU984

文献标志码: A

引用格式:顾康康,冉桃滔,黄水明,等.气候变化视角下城市街道可步行性与热风险的耦合研究:以合肥市为例[J].沈阳建筑大学学报(社会科学版),2024,26(3):288-295.

气候变化导致极端高温事件频发,严重威胁人类的生命健康安全。热岛效应的加剧使城市居民面临更为严峻的热风险。街道作为城市户外环境的重要组成部分,是居民最常用的室外空间之一,也是步行的重要场所,故市民日常活动面临极大的热风险。中国快速城镇化过程中忽视以人为本的建设造成市民日常体力活动减少,肥胖及慢性非传染性疾病增加。中国为此大力推广绿色出行理念,已有43座城市制定了街道设计导则,并将建设友好的慢行交通系统作为重要环节。龙瀛

等^[1]研究得出,2013年来,全国重点城市可步行性得到改善,说明步行友好城市理念正在发挥着推动作用。然而,夏季极端高温天气的影响强度、作用时间和发生频率正持续增加,这便产生了一种矛盾,即提高建成环境步行条件或会增加市民高温暴露风险,步行活动的健康效应难以判断。因此,综合评判城市步行空间的热风险并识别街道类型可为城市建设和管理提供参考。

步行性用来衡量步行友好水平的高低,其广泛应用于公共卫生和城市规划领域。步

收稿日期:2023-09-14

基金项目:安徽省教育厅高校自然科学基金项目(2022AH010021);国家级大学生创新创业项目(202210878016)

作者简介:顾康康(1982—),男,安徽蚌埠人,教授,博士。

行指数是当前影响大、运用范围广的步行性评价工具,多应用于街道活力^[2]、公共服务设施布局^[3]和房价评估^[4]等方面。近年来,步行指数研究愈发重视健康维度。陈曦等^[5]通过耦合步行性与空气污染空间来识别城市中存在的负健康效应区域;崔海莹等^[6]通过地表温度和面域步行指数识别了存在热风险的城市空间;顾浩等^[7]通过引入环境维度和社会维度指标,探讨了改进后的步行指数在公共健康研究上的必要性和显著性。尽管结合步行性开展的健康研究已有不少成果,但步行性与热风险相结合的研究较少。同时,现有步行热环境研究缺少社会与经济维度的考虑。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change,IPCC)的基于危害、暴露和脆弱的风险评估框架已广泛运用于各类灾害风险评估,但在步行热风险评估方面运用较少。

综上所述,本研究以街道为空间单元进行可步行性评价,基于“危险-暴露-脆弱”框架评估城市街道热风险,通过空间耦合分析,探讨街道步行热风险的分布特征及影响因素,以期为中国宜居城市建设提供参考。

一、研究区域及数据

1. 研究区域概况

合肥市位于安徽省中部,属亚热带季风性湿润气候,自 2000 年以来城区地表温度每十年上升约 0.89 ℃,近 5 年夏季高温持续时间长的特点更为明显。因此,探讨合肥市街道步行热风险具有一定代表性。

2. 数据来源及预处理

本研究所用道路数据来源于 OSM 地图;用于计算步行指数的兴趣点(Point of Interest,POI)数据通过高德地图爬取,数据包含名称、类别和位置信息;反演地表温度的 Landsat8 遥感影像来源于地理空间数据云网站;人口分布数据来源于 Wordpop 网站,空间分辨率为 100 m,并根据合肥市统计局提供的第七次全国人口普查数据进行校正;绿视率由 ResNet 网络对街景图片进行语义分

割获得。所有数据均以 2020 年为获取年,并与遥感影像同步。

二、研究方法

1. 步行指数计算

参照步行指数计算方法,结合指标本土化研究成果确定各类 POI 设施权重(见表 1)。按照 400 m、800 m、1 200 m、1 600 m、2 400 m 的缓冲范围统计街道 POI 类型权重得分。用权重得分乘以相应的服务距离衰减系数,获得基础步行指数。

表 1 设施分类及权重得分

设施分类	权重得分	设施分类	权重得分
餐馆	3	图书馆、书店	1
咖啡店、奶茶店	2	学校	1
超市	3	银行	1
商场	2	医院	1
娱乐场所	1	出行站点	1
运动场馆	1	美容美发店	1
公园广场	2		

考虑交叉口密度和道路长度对步行性的影响,对基础步行指数进行修正。服务距离衰减、交叉口密度衰减、道路长度衰减分别划为 6 级,衰减系数如表 2 所示,其中交叉口密度以道路中点统计,道路长度为自身长度。计算公式如图(1)所示。

表 2 服务距离衰减系数

衰减分区/m	衰减系数/%
[0,400)	0
[400,800)	10
[800,1200)	45
[1200,1600)	75
[1600,2400)	99.92
[2400,+∞)	100

表 3 道路长度衰减系数

衰减分区/m	衰减系数/%
[0,120)	0
[120,150)	1
[150,168)	2
[168,180)	3
[180,195)	4
[195,+∞)	5

表 4 交叉口密度衰减系数

衰减分区(个·km ⁻²)	衰减系数/%
[77,+∞)	0
[58,77)	1
[46,58)	2
[35,46)	3
[23,35)	4
[0,23)	5

$W_a = W_b \times (1 - a_i - a_l)$ (1)

式中: W_a 为修正步行指数; W_b 为道路基础步行指数; a_i 为交叉口衰减系数; a_l 为道路长度衰减系数。

2. 热风险评估

IPCC 的“危险-暴露-脆弱”风险评估框架已从“经济、社会、环境”三大维度开展了诸多研究^[8]。本研究借鉴相关研究评估指标并结合高温天气步行出行特征,从热危险性、热暴露性和热脆弱性这 3 个维度评估热风险,评估框架如图 1 所示。

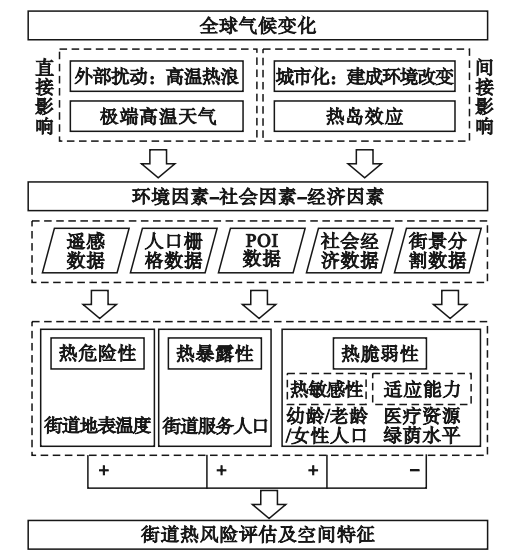


图 1 街道步行热风险评估框架

热危险性指发生高温危害的程度,用每条街道的平均地表温度标准化值表示。热暴露性指暴露在高温环境中的人数,以街道的服务人口标准化值表示。热脆弱性指承灾体受到高温影响的程度和适应能力,本研究特指人群健康受高温影响的敏感性以及街道处理热健康影响后恢复的适应性。其中,热敏感性以受高温影响作用较明显的婴幼儿(5 岁及以下)、老年人(65 岁及以上)和女性 3 类弱势人群数量的标准化值表示;适应性为缓解高温影响以及发生高温风险后的救治能力,由道路绿荫水平、街道应急范围内具有基本救治能力的医疗设施数量的标准化值来表示。本研究中对热脆弱指数的计算需要科学确定热敏感和适应性的 5 项因子权重。由于常用的确权方法、层次分析法和熵权法各有

利弊^[9],采用综合权重法能够克服单一确权方法的局限性。故采用最小信息熵原理和拉格朗日函数计算综合权重,加权得到热脆弱指数。计算公式为

$$W_j = \frac{(w_{j1} \times w_{j2})^{0.5}}{\sum_{j=1}^n (w_{j1} \times w_{j2})^{0.5}} \quad (2)$$

式中: W_j 为综合权重; w_{j1} 为层次分析法确定的主观权重; w_{j2} 为熵权法确定的客观权重。

街道热风险由热危险性、热暴露性和热脆弱性 3 项指标加权综合得出,本研究通过等权重乘法进行计算^[10]。计算公式为

$$R = D \times E \times V \quad (3)$$

式中: R 为街道热风险指数; D 、 E 、 V 分别为街道中热危险性、热暴露性和热脆弱性的标准化值。

三、结果与分析

1. 可步行性分布特征

按步行指数计算方法得到合肥市街道步行指数,并按国际标准分为 5 类(见图 2)。由图 2 可知,合肥市街道步行指数得分整体较高。研究普遍认为得分 70 分以上的街道适宜步行,研究范围内街道总长度为 3 264.69 km,其中适宜步行的街道共计 1 791.49 km,占 54.87%;得分为 90 分以上的高步行性街道共计 239.28 km,占 7.33%。街道步行指数在空间上呈多点集中、内强外弱的轴向衰减格局,这与城市由中心向外部逐步扩张发展及基础服务设施内多外少有关。由于步行指数与基础服务设施多少有关,因此高步行街道通常位于城市的中心。步行得分高的街道主要分布在滨湖世纪金源地区(1)、大学城地区(2)、天鹅湖地区(3)、合肥南站地区(4)、环城湖公园内地区(5)以及合肥站地区(6),这些地区分别是合肥市的新城中心、高教中心、政务中心、交通中心和老城中心,区域内基础设施完备、可步行性高。低步行街道分布于市郊(7、8、12),这些地方通常正在建设、缺乏人流量且基础服务设施较少。值得注意的是,在合肥市南部和东北部存在大量工业区(9、10、11),基础

服务设施少,因此在中高步行区域中形成了大量中低步行街道的孔隙地带。总体来说,合肥市主要建成区域街道的步行性良好,具有夏季高温天气步行的潜在可能,因而存在高温危害的潜在风险。

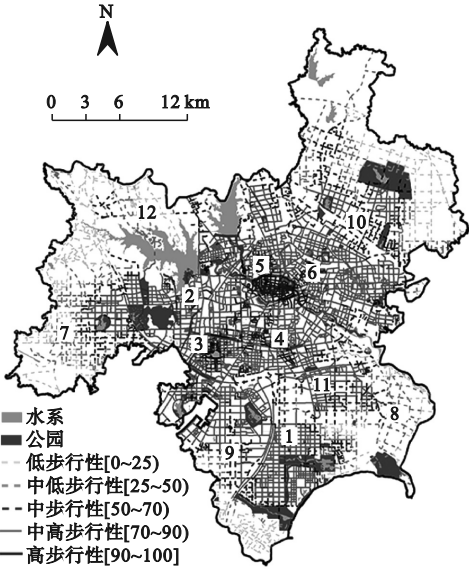


图 2 合肥市街道的可步行性

2. 热风险评估结果

(1) 热危险性

由图 3(a)可知,合肥市热岛效应显著,建成区地温显著高于市郊。统计街道平均地温并

标准化处理得到街道热危险指数,按自然间断点法分为 5 级(见图 3(b))。街道热危险等级占比由高到低依次为中危险(24.44 ~ 37.80 ℃, 30.65%)、中 高 危 险 (37.80 ~ 40.30 ℃, 29.80%)、中 低 危 险 (33.01 ~ 36.29 ℃, 18.19%)、高危险(40.30 ~ 45.62 ℃, 13.02%)、低危险(26.55 ~ 33.13 ℃, 8.34%)。中高危险以上街道占研究区域街道的 42.82%,高危险街道占研究区域街道的 13.02%,说明合肥市近半数街道具有较高的热危险性,空间分布特征与遥感反演结果一致,建成区显著高于市郊并具有明显的集聚特征。对街道热危险指数进行空间自相关分析,全局莫兰指数 $I = 0.604, P < 0.001$,说明合肥市街道热危险有较强的空间关联。结合图 3(c)可以看出,高高聚类集中分布在中部建成区和南、北部工业区,这类地区建成强度大、热岛强度高;低低聚类分布于郊区和南部滨湖新区,原因是位于建成区外围且紧邻巢湖,蓝绿空间丰富降低了热岛效应;低高聚类则零散分布中部建成区,主要位于公园绿地和水系周边;高低聚类则位于高高与低低连接处。由此可见,研究范围内街道整体均面临较高热危险,且与建成区强度有较强相关性,但蓝绿空间能有效降低街道热危险。

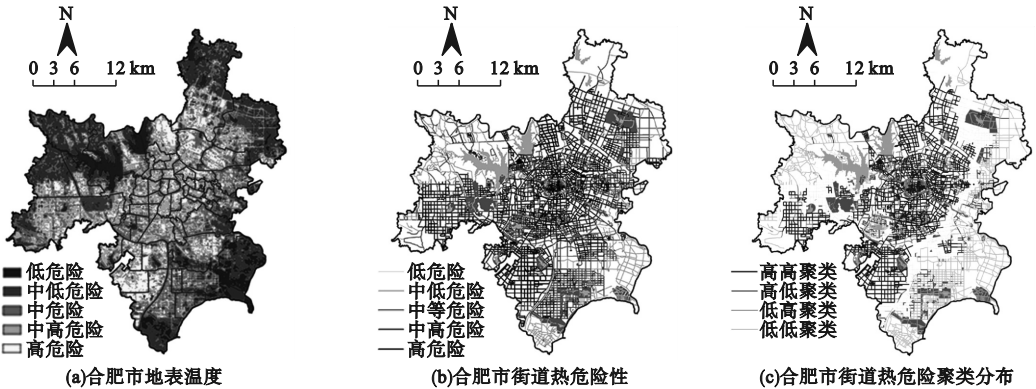


图 3 合肥市地表温度、街道热危险性和街道热危险聚类分布

(2) 热暴露性

统计街道服务人口数并将其标准化得到热暴露指数,按自然间断点分级法将热暴露指数分为 5 级(见图 4)。由图 4 可知,中暴露度以下街道占比较大,占研究区域街道长度的 80.66%,而中高暴露街道和高暴露街道

分别仅占 10.89%、8.45%。空间上合肥市街道的热暴露水平呈现中高外低,集聚特征较明显。热暴露较高路段主要集中在中部,围绕环城公园成环带状分布,并且主要位于二环路以内。南部滨湖新区近年吸引了大量人口入住,也呈现出较高的热暴露性。整体上,合肥市热

暴露水平呈现“大小双核、中高外低”的特征。

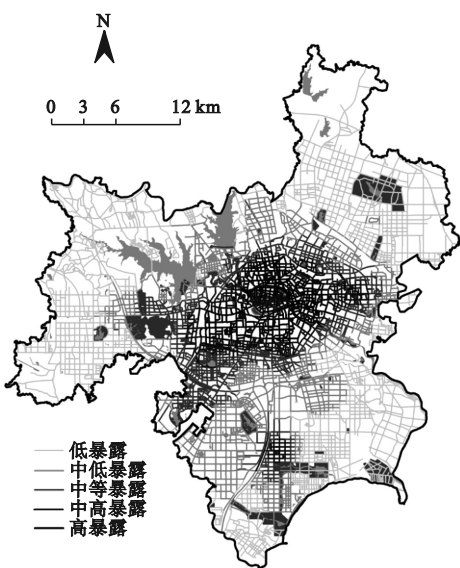


图 4 合肥市街道的热暴露性分布

(3) 热脆弱性

本研究将影响热脆弱性的 3 项热敏感性和 2 项适应性指标做标准化处理并将其分为 5 级(见图 5)。由图 5 可知,5 项指标的空间分布特征差异较大。低龄脆弱与高龄脆弱在

空间上呈相反特征,高龄脆弱中较高的街道集中在中部一环路以内;低龄脆弱中较高的街道则分布在中心外围和滨湖新区等区域;女性脆弱性的分布特征与热暴露性分布相似,说明合肥市人口男女比例较为均衡。绿荫脆弱性在空间上没有显著特征,但整体上呈现郊区高于建成区、老区高于新区、工业区高于居住区的趋势。老城区和滨湖新区周边地区医疗设施相对完善,医疗脆弱显著低于其他区域。层次分析法和熵权法得出的热脆弱性指标综合权重如表 3 所示。同样,将热脆弱性结果按自然间断点法分为 5 级。由图 5 可知,合肥市街道热脆弱性情况整体较好,中脆弱以下街道占研究区域街道长度 86.27%,而中高脆弱和高脆弱街道长度占比分别为 10.29%、3.44%。中脆弱以上街道主要分布在中部建成区及南部滨湖新区,外围郊区热脆弱性整体处于低位。值得注意的是,中部建成区热脆弱性整体呈现圈层现象,老城区中高脆弱性、外围中高脆弱性街道中夹杂部分高脆弱性街道。

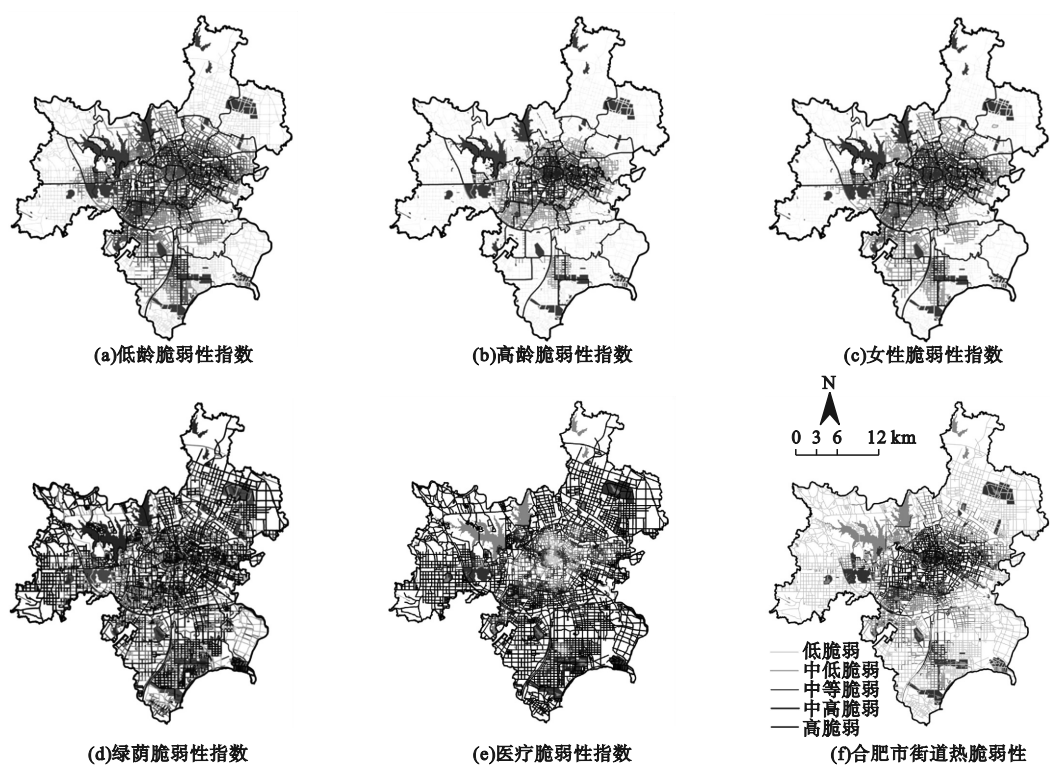


图 5 合肥市街道的热脆弱性分布

表 3 热脆弱性指标权重

权重类型	热敏感性			适应性	
	低龄脆弱性	高龄脆弱性	女性脆弱性	医疗脆弱性	绿荫脆弱性
熵权法权重	0.262 4	0.413 6	0.291 7	0.014 0	0.018 2
层次分析法权重	0.139 8	0.313 3	0.046 8	0.375 0	0.125 0
综合权重	0.242 9	0.456 4	0.148 1	0.092 0	0.060 5

(4)热风险性

本研究通过叠加运算得到街道热风险性,并分为 5 级(见图 6)。由图 6 可知,合肥市中高热风险性以上街道分布在中部老城区周边 4 个组团区域,总长度为 276.08 km,仅占研究区域街道的 8.46%,从占比看,合肥市街道的热风险性并不严重。但有 361.82 km 的街道属于中度热风险性,占比达 11.09%,且西部高新区有较高的热危险性,随着合肥市向西发展战略的提出,热暴露性增加可能会使这类街道成为高风险性街道,因此这类街道应当被划定为潜在风险街道。总体来说,合肥市步行街道的热风险性并不严重,但整体的适应风险能力较弱,容易受到人口增加、老龄化加剧、极端气温强度增加的影响,这类风险仍需高度关注。

性分别重新分类为 3 类,再叠加得到 4 类、6 种街道(见图 7):预警街道(高步行-高风险)、友好街道(高步行-低风险)、潜在风险街道(高步行-中风险)和提升街道(低步行-低风险、中步行-低风险、中步行-中风险)。整体来看,合肥市街道步行风险类型在空间上存在明显圈层现象,即由内到外分为 3 个圈层。

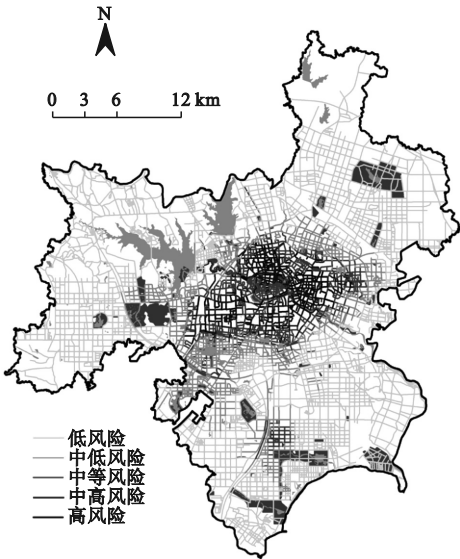


图 6 合肥市街道的热风险性分布

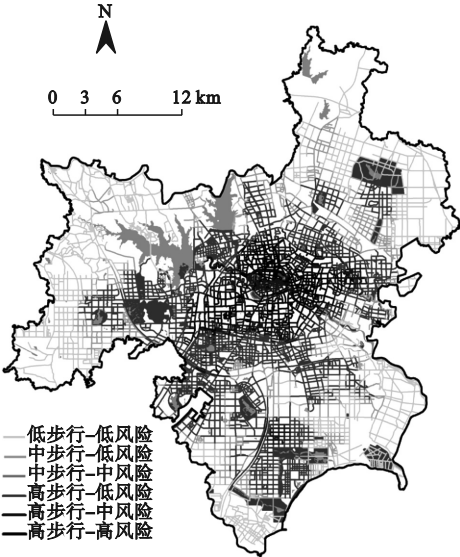


图 7 合肥市街道的步行热风险性分布

3. 步行性与热风险耦合分析

(1)步行热风险特征

将步行性与热风险性进行空间耦合分析。为方便统计,先将街道步行性与热风险

第一圈层主要包括预警街道和潜在风险街道。预警街道位于中部环城湖公园外围,集中分布在环城湖公园东北方向,占研究区域的 8.46%。这些街道大多位于年代较早的安置区,由于建成强度高,社区开放性强,靠近旧城中心,因此具有完善的生活服务配套设施,步行性较高。但由于位于城市中部,且缺少集中连片的蓝绿空间,热岛效应严重。在人口结构上,因为处于城市内外过渡区域,故热暴露人数、低龄人数、高龄人数和女性人数在研究范围内均位于高值。因此,尽管预警街道的适应性不低,但仍面临高步行热风险性。潜在风险街道占研究区域的

11.08%,集中于环城公园内和南部滨湖新区世纪金源社区,与预警街道相比,潜在风险街道也有较高的步行性,但热风险性更低。环城公园内街道的热暴露水平较低,幼龄人数少、医疗覆盖水平高,加之有集中连片的环城湖公园和护城河,故该区域热敏感相对较低,且有较高的适应能力。世纪金源区域位于城市新区,靠近巢湖、附近有大型城市公园,高龄人数少、医疗覆盖水平高,故该区域热危险性和热敏感性相对较低,且有较高的适应能力。

第二圈层是友好街道,占研究区域的35.36%。这些街道在合肥市南部占比较高,这与合肥市向南发展的趋势相符。友好街道的建设年代较近,建成度高、设施完善,路网便捷,适合步行,友好街道的低风险特征与不同区域的主导因素有关。滨湖新区位于合肥市南部,人口暴露度高,但热危险性低,且热敏感性人口比例小,因此热风险低。而西南的工业园区,热危险性高,但人口暴露度低,绿荫覆盖率高,热敏感人群较少,因此热脆弱性较低。第二圈层街道位于集中建成区与郊区过渡地带,虽热危险性有所降低,但人口暴露度仍然是影响热风险性的主要因素。友好街道的低步行风险特征与人口暴露度和热敏感人群数量有关,随着服务人口增加和年龄结构变化,这类街道可能会转化为预警街道或潜在风险街道。

第三圈层为提升街道,该类占据研究区域的17.22%,主要分布在城市的郊区和大型公园附近。这些区域的建设水平相对较低,其依赖第二圈层的生活服务设施维持着一定的步行性。由于靠近郊区,这些街道的热危险性、热暴露性和热脆弱性都相对较低,因此热风险性也较低。低-低街道占27.90%,由于缺少生活服务设施且人口密度低,所以步行性和热风险性均较低。

(2) 各类街道影响强度

采用街道单位长度服务人次作为影响强度指标(见表4),由表4可知,预警街道影响强度为42.03万人次/km,是友好型街道的2.39倍;潜在风险街道影响强度为49.41万

人次/km,是友好型街道的2.88倍。这组数据表明,尽管预警街道和潜在风险街道的占比较低,但它们位于人口密集区域,因此步行热风险性的影响范围更广。而提升街道占比最大,因此影响人次也最多。综上所述,尽管合肥市步行预警街道占比较少,友好街道占比较多,但友好街道的热危险性并不低,由热暴露性和热脆弱性带来的热风险性状态并不稳定,其与潜在风险街道一样容易随着温度升高或人口结构的动态变化而发生突变。

表 4 各类型街道的影响强度

街道类型	影响强度/(万人次·km ⁻¹)
预警街道	42.03
潜在风险街道	49.41
友好街道	17.17
提升街道	69.79

四、结 论

本研究以合肥市中心城区为研究区域,基于步行指数和IPCC“危害-暴露-脆弱”风险评估框架,综合评价街道步行热风险,并通过耦合划分街道类型。主要结论如下:①合肥市街道步行性整体较好,具备高温出行潜力,但也面临高温威胁。②集中建成区的街道热危险性较高,与区域开发强度和蓝绿空间水平有关,街道的热风险性等级主要受到热暴露性和热脆弱性等级的影响。随着人口增长、老龄化和极端高温频率的增加,高热危险性街道的热暴露性和热脆弱性等级可能会增加,需要引起高度关注。③合肥街道热风险类型呈现圈层分布。预警街道和潜在风险街道位于第一圈层,数量最少;友好街道位于第二圈层,数量较多,较低的热风险性与低热暴露性和低热敏感性有关;提升街道位于第三圈层,数量最多。友好型街道和潜在风险街道都容易受到人口增加、老龄化以及高温热浪强度增加的影响。④预警街道和潜在风险街道的影响人次分别是友好型街道的2.39倍和2.88倍,说明步行风险情况并不如空间分布所示的乐观。预警街道和潜在风险街道的影响程度更深远。

预警街道和潜在风险型街道应通过增加

绿化和设置遮阴休憩节点等方式降低热暴露度。同时,引导热脆弱人群减少高温天气的出行次数,并合理配置医疗设施以降低热脆弱性。提升型街道需增加基础设施和塑造街道空间以提升步行性,通过加强蓝绿空间和医疗资源建设,以对抗人口结构变化带来的热暴露性和热脆弱性增加的风险挑战。此外,更需关注弱势群体的健康公平性,基于空间特征和弱势群体室外行动习惯,有针对性地提升慢行系统和降温设施,以确保城市健康发展。

参考文献:

[1] 龙瀛,赵健婷,李双金,等. 中国主要城市街道步行指数的大规模测度[J]. 新建筑,2018,178(3):4-8.

[2] 冉绍辉. 基于步行指数的城市街道活力量化研究[D]. 郑州:郑州大学,2019.

[3] 黄建中,胡刚钰,李敏. 老年视角下社区服务设施布局适宜性研究:基于步行指数的方法[J]. 城市规划学刊,2016(6):45-53.

[4] 郭金函,马子迎,边经卫,等. 基于街景图像的

厦门本岛环境特征对住宅价格的影响研究[J]. 地球信息科学学报,2022,24(11):2128-2140.

[5] 陈曦,冯建喜. 基于步行性与污染物暴露空间格局比较的建成环境健康效应:以南京为例[J]. 地理科学进展,2019,38(2):296-304.

[6] 崔海莹,银超慧,卢新海,等. 基于步行性的城市热环境暴露风险区识别及其健康效应:以武汉市主城区为例[J]. 地域研究与开发,2023,42(1):75-80.

[7] 顾浩,周楷宸,王兰. 基于健康视角的步行指数评价优化研究:以上海市静安区为例[J]. 国际城市规划,2019,34(5):43-49.

[8] 霍童,张序,周云,等. 基于暴露-敏感-适应性模型的生态脆弱性时空变化评价及相关分析:以中国大运河苏州段为例[J]. 生态学报,2022,42(6):2281-2293.

[9] 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.

[10] 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.

Coupled Analysis of Walkability and Heat Risk in Urban Streets under the Context of Climate Change: A Case Study in Hefei City

GU Kangkang^{1,2}, RAN Taotao¹, HUANG Shuiming¹, HONG Wei¹

(1. School of Architecture & Urban Planning, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China; 2. Anhui Provincial Territory Spatial Planning & Ecology Academy, Hefei 230601, China)

Abstract: In the context of climate change, the one-sided emphasis on improving street walkability overlooks the impact of high temperatures on human health. Taking Hefei city as an example, this study evaluated street-level pedestrian heat risk using a "hazard-exposure-vulnerability" risk assessment framework based on walkability index. The results show that the overall walkability in Hefei is good, showing a spatial pattern of "concentrated points, strong internal and weak external", but walkability faces high temperature hazards. The proportion of medium-high heat risk streets in Hefei is low, but the overall resilience is weak, making them susceptible to turning into high heat risk streets with population growth, aging intensification, and the increased extreme temperatures. The street-level pedestrian heat risk in Hefei exhibits a layered distribution, mainly influenced by exposure and vulnerability levels. The impact of warning streets and potential risk streets is more profound than that of friendly streets.

Key words: climate change; heat wave; walkability; heat risk; walkability risk

(责任编辑:王丽娜 英文审校:林 昊)