

建成环境对户外空间健身活力的影响及其异质性 ——以武汉市主城区为例

魏 伟^{1,2,3}, 章 阳¹, 洪梦瑶^{1,3*}, 夏俊楠¹

(1. 武汉大学城市设计学院, 武汉 430072; 2. 武汉大学中国发展战略与规划研究院, 武汉 430072;

3. 湖北省人居环境工程技术研究中心, 武汉 430072)

摘 要:探讨城市户外空间健身活力的建成环境影响机制对促进全民健身具有重要意义。论文以武汉主城区为例, 基于Keep健身轨迹数据探究户外空间健身活力强度, 采用多层线性模型(hierarchical linear model, HLM)与多尺度地理加权回归模型(multiscale geographically weighted regression, MGWR)分析建成环境对健身活力的影响及其异质性。结果表明:①不同功能类型区健身活力差异巨大, 绿地主导型空间健身活力最大, 且运动场所密度、水系空间指数对此类空间促进作用更加明显; 居住主导型空间健身活力也较大, 且支路密度、容积率对该类空间正向影响更强; 工业主导型最弱, POI混合度、地价对此类空间正向效果明显。②不同空间区位健身活力差异巨大, 总体呈现“核心—边缘”结构, 组团集聚特征明显, 且不同区位受POI混合度、道路密度、建筑密度、绿化率影响的差异较大。研究结果显示城市建成环境对户外健身活力的多重影响, 可为面向健身友好的城市功能及形态优化提供参考。

关键词:建成环境; 健身活力; 影响机制; 异质性; 武汉

在“健康中国”“全民健身”国家战略引领下, 2021年国务院《全民健身计划(2021—2025年)》要求“加大全民健身场地设施供给”。然而, 城市空间的拥挤紧凑限制了专门化、公共性健身场地的拓展, 难以满足居民健身活动的需求^[1]。2022年国务院《关于构建更高水平的全民健身公共服务体系的意见》进一步强调“优化城市全民健身功能布局”, 要求“拓展全民健身新空间”, 支持城市公园、步道等公共空间的健身化转变, 健身活动空间进一步向城市慢行系统、蓝绿空间、广场乃至小区人行路等户外开放空间拓展^[2]。空间健身活力是健身活动与空间场所交互的结果, 既是空间健身品质的体现, 也是居民健身偏好的重要表征。因此, 围绕户外空间的健身活力测度、影响机制挖掘有助于辨析居民健身需求内涵、促进户外空间的健身友好性提升。

当前针对建成环境与健身行为交互关系的研究多基于居住地与特定健身场地等“小空间”。通过现场调研与问卷调查等传统方式获取个人属性、健身活动偏好、活动量等信息^[3], 并结合GIS、RS、GPS等技术定量测度建成环境的“3D”(密度、多样性、设计)或“6D”(密度、多样性、设计、目的地可达性、交通可达性、需求管理)特征^[4-5], 探究建成环境要素与“个人活动”之间的关系。相关研究也证明了城市建成环境对各类健身活动具有显著的影响作用^[6-9]。针对特定健身活动场地的研究则更加聚焦于设施配置、景观绿化、建筑布局、交通组织等微观要素对健身活动的影响^[10-14]。同时研究也表明不同类型空间的建成环境对健身的影响有所不同。研究发现公园周边POI混合度过高会降低居民健身活动的可能性^[15], 而社区内POI则对其健身活动

收稿日期: 2023-06-01; 修订日期: 2023-09-06。

基金项目: 国家社科基金后期资助项目(19FGLB034)。[Foundation: National Social Science Foundation of China, No. 19FGLB034.]

第一作者简介: 魏伟(1976—), 男, 宁夏银川人, 博士, 博士生导师, 主要从事公共服务设施研究。E-mail: weiwei@whu.edu.cn

*通信作者简介: 洪梦瑶(1995—), 女, 湖北恩施人, 博士后, 主要从事公共服务设施研究。E-mail: hong.my@whu.edu.cn

引用格式: 魏伟, 章阳, 洪梦瑶, 等. 建成环境对户外空间健身活力的影响及其异质性: 以武汉市主城区为例 [J]. 地理科学进展, 2024, 43(1): 93-109. [Wei Wei, Zhang Yang, Hong Mengyao, et al. Influence of the built environment on outdoor space fitness vitality and its heterogeneity: A case study of the Wuhan urban area. Progress in Geography, 2024, 43(1): 93-109.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2024.01.007

会产生正向影响^[16];绿道空间的街道连通性不利于居民健身活动^[17],而社区的街道连通性却有助于居民健身^[18]。随着城市居民户外健身呈现多样化趋势^[19],大量受限于空间、资本、管理的“非正规”健身空间开始被重视,加强全域尺度下各类新、旧健身空间的整体性研究是促进全民健身的重要议题。

影响机制探究上,既有研究多采用非空间模型,将研究对象作为匀质化整体分析建成环境要素对健身活动的影响。如有学者采用多元线性模型探究建成环境对生命周期不同阶段居民的休闲健身活动的影响^[20];采用多层、多阶段线性回归模型分析建成环境对居民健身活动强度的影响^[21-22];采用多项逻辑回归模型,分析城乡、街区环境特征及体育场馆对居民健身锻炼的影响^[23-25];通过结构方程模型探究建成环境对居民健身活动的影响路径,并挖掘中介效应^[26-27];基于机制分析结果提出相关要素的健身友好性空间优化建议^[28]。

综上所述,当前研究对新时期更多样化的户外健身空间扩展的关注尚不足,抽样调研的方式对全域尺度下健身活动的整体性把握也较欠缺^[3];针对不同类型“小空间”的研究也结论各异,难以指导城市“大空间”的规划布局。另外,当前研究采用非空间的线性回归模型进行影响机制探究时,模型假设样本之间是相互独立的,与现实世界中城市特定功能结构形态所形成的紧密联系的空间环境特征相悖^[29],对异质化城市空间本身的功能特征、空间区位等固有属性关注不足。

因此,为解决研究范围局限、多样化健身新空间关注不足的问题,本文基于宏观的空间活力视角,突破“个人活动”本身,利用户外健身活力强度表征居民健身偏好与空间健身品质,并探讨全域尺度下建成环境要素与户外空间健身活力的关系。而针对城市自身功能布局与空间结构组织等固有差异导致的健身活力分布不均匀、局部空间集聚特征明显的异质化现象,本文一方面采用多层线性模型(hierarchical linear model, HLM),通过考虑研究单元功能属性间的固有差异,分组探究建成环境要素的影响作用,缓解健身活力在特定功能区的“集聚”对影响机制的挖掘产生的干扰;另一方面,引入多尺度地理加权回归模型(multiscale geographically weighted regression, MGWR),考虑研究单元所处的空间区位,允许各个研究变量拥有不同的带宽,

更能揭示影响机制在不同空间区位上的差异性,从而由两个维度有效解决以往研究中缺乏对城市功能属性、空间区位等多重异质性的讨论缺陷。

基于此,本文立足于健身友好型城市的功能、结构、形态布局,从功能类型和空间区位两个维度出发,分别探究城市建成环境对户外空间健身活力的影响作用及其差异性。具体而言,本文基于城市地理空间数据、Keep平台运动轨迹数据等多源大数据,首先,从空间活力的视角,通过户外健身活动轨迹分布探究武汉主城区健身活力强度的分布特征;其次,利用传统线性回归对户外空间健身活力的影响机制进行初步探究;最后,通过加入功能类型与地理位置要素,运用多层线性回归模型与多尺度地理加权回归进一步从功能类型、空间区位两个维度分析影响机制及其异质性,以此论证建成环境对健身活力的影响不仅存在独立效应,而且其作用效果还会因网格功能、空间区位不同存在差异(图1)。从而为优化城市功能布局与空间结构组织、创造健身友好型城市形态提供针对性经验证据。

1 研究区域、数据及方法

1.1 研究区域

武汉市城内蓝绿空间纵横,城中村与现代商厦并存,具有较强的研究示范性;结合数据的可获得性、有效性,选取武汉市主城区^①为研究对象,即以三环线以内区域为主的城市地区,总面积约521.45 km²。

1.2 研究数据

1.2.1 健身活动分布数据

健身活动数据来源于健身软件Keep平台。2019年Keep已发展为国内最大的健身爱好者社群平台,主要用户囊括了各年龄段最主要的社会群体,数据具有很强的代表性。本文基于2020年武汉市主城区内健身数据,根据健身轨迹与建筑布局的空间叠合关系,提取了户外健身活动轨迹数据共1706845条(图2)。户外健身数据包括点状与线状健身轨迹两种,点状健身活动分布较为广泛,线状健身则主要分为沿运动场跑道健身、沿街区外部道路健身、沿滨水空间健身等类型。

活力强度由人类活动与空间场所的交互所产生,外在表征为从事各种活动的人及其分布密度^[30]。因此,为定量测度武汉市主城区健身活力,本文基

① 边界来源:《武汉市国土空间总体规划(2021—2035年)》。

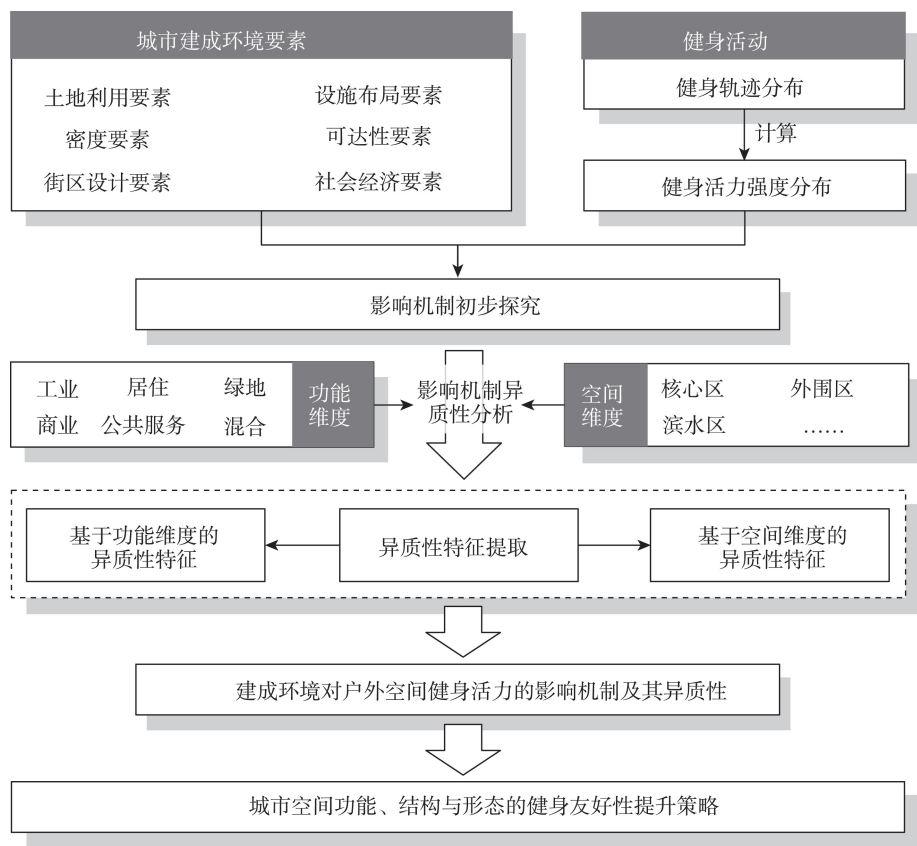


图1 建成环境与户外空间健身活力的研究框架

Fig.1 Framework of the research on the relationship between built environment and outdoor space fitness vitality

于大多数户外健身活动的空间尺度,构建 500 m×500 m 网格,将网格单元内的每一次健身活动记为 1 个活力单量;对于穿过多个网格的健身活动轨迹,则对这些网格分别统计 1 次活力单量,从而分区统计网格单元内各类户外健身活动总量,作为该网格单元的健身活力(图 3)。

1.2.2 功能属性数据

采用土地利用类型确定网格功能,依据研究需要将网格单元内各用地归纳为居住、商业、工业、公共服务、公园绿地 5 类(剔除了其中的城市道路用地与水系),通过地块面积比例相对值计算各网格功能类型。具体判读方式为:当某一类用地面积占该网格内 5 类用地总面积的 50% 时,则确定该网格单元为单一功能区;当网格单元内各类用地面积均没有达到 50% 时,确定该单元为混合功能区。由此将网格功能划分为居住主导型网格单元、商业主导型网格单元、工业主导型网格单元、公共服务主导型网格单元、绿地主导型网格单元、混合型网格单元 6 类。土地利用类型数据来源于宫鹏等^[31]的《中国基本城市土地利用类型制图:2018 年结果》,为确保功

能划分准确无误,进一步对计算结果与卫星图进行目视校核(图 4)。

1.2.3 建成环境数据

如表 1 所示,参考 6D 维度,将城市建成环境特征分为土地利用、密度、街区设计、设施可达性、交通可达性、空间品质 6 类,选取与健身活动密切相关的建成环境变量。建成环境特征数据主要来源于高德地图、天地图、全国基础地理数据库等地理空间大数据平台。

1.3 研究方法

1.3.1 空间自相关

空间自相关分析包括全局空间自相关与局部自相关,其中全局空间自相关是指通过 Moran's I (莫兰指数)分析研究对象在全局尺度下的相关性,用于描述各网格单元的户外健身活力在整个研究区域的空间依赖程度,可反映户外空间健身活力是否在空间上聚类。而局部自相关,即 LISA (空间关联局部指标),是将研究单元与其相邻区域的各个尺度进行相关性分析,能更直观地反映研究区户外健身活力的局部集聚特征。

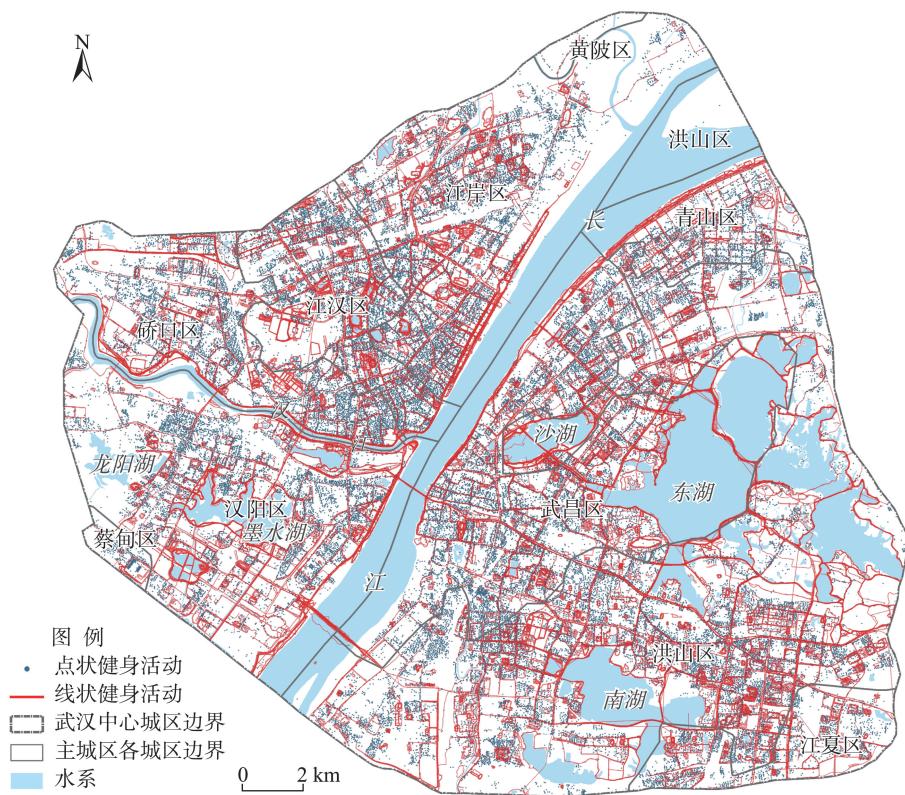


图2 武汉市主城区户外健身活动分布

Fig.2 Spatial distribution of outdoor fitness activities in the Wuhan urban area

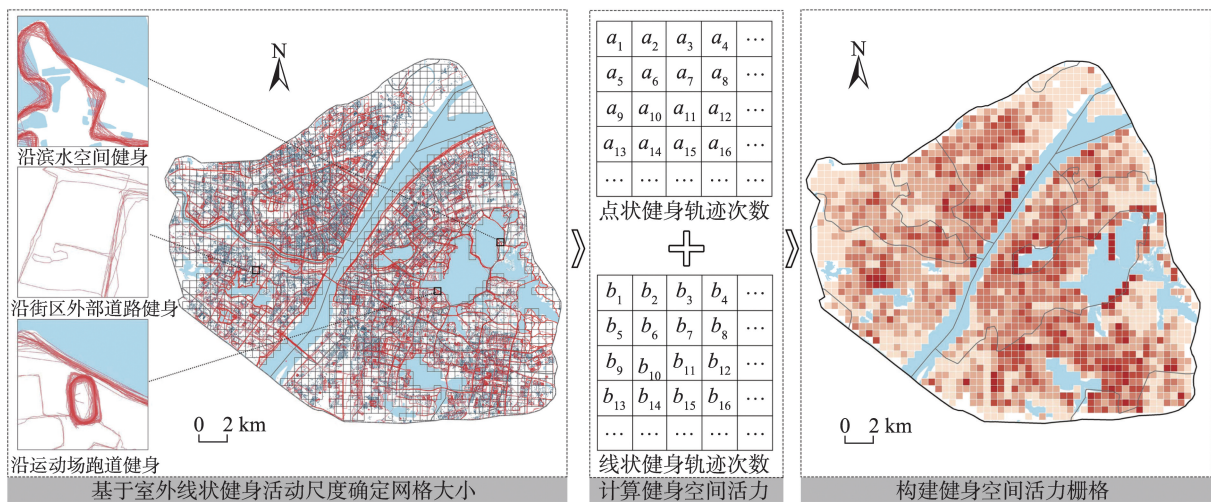


图3 健身活力计算原理

Fig.3 Principle of fitness vitality calculation

1.3.2 多层线性模型(HLM)

本文首先采用传统的多元线性回归进行影响机制的初步探究,再采用多层线性模型从功能类型维度分析影响机制及其异质性。多层线性模型主要用来研究具有嵌套结构数据的相关性,作为多元

线性回归模型的完善与补充。由于不同功能类型网格的建成环境要素层次特征明显,本文采用多层线性模型探究健身活力的影响机制以及功能类型与建成环境要素间是否存在交互作用。具体公式如下:

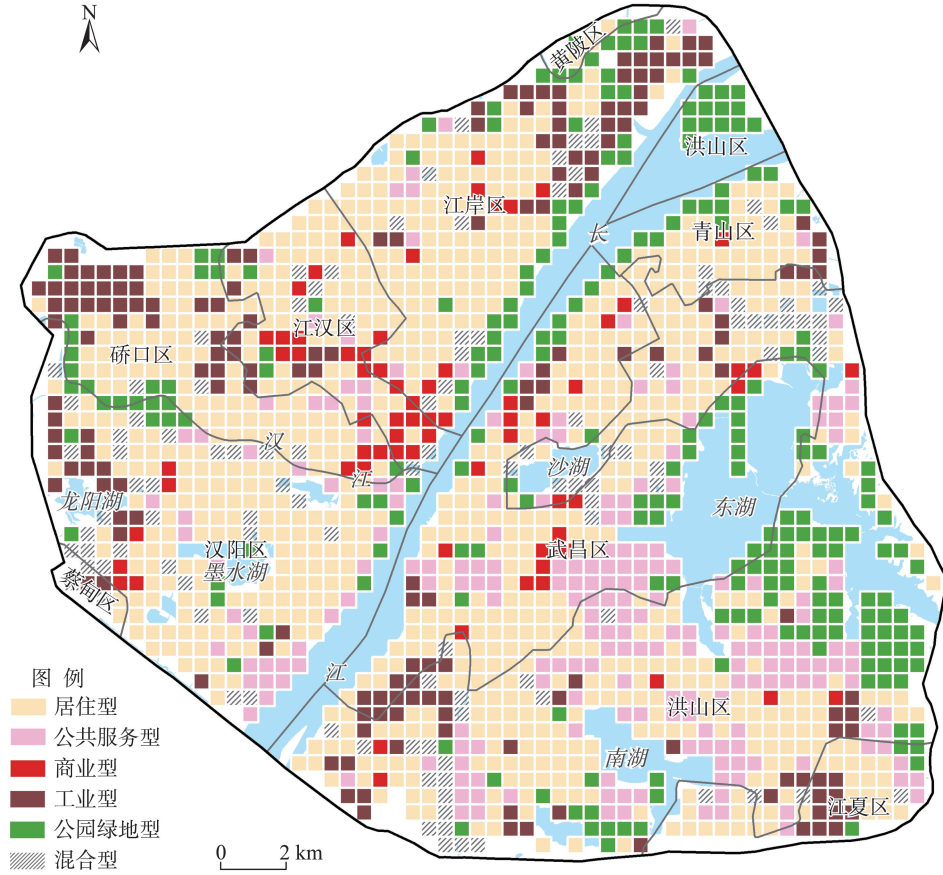


图4 武汉主城区各空间单元功能划分

Fig.4 Functional classification of spatial units in the Wuhan urban area

$$\text{层1: } EX_{ij} = \beta_{0j} + \beta_{1j}X_{ij} + e_{ij} \quad (1)$$

$$\text{层2: } \beta_{0j} = \gamma_{00} + \gamma_{01}W_j + \mu_{0j} \quad (2)$$

$$\beta_{1j} = \gamma_{10} + \gamma_{11}W_j + \mu_{1j} \quad (3)$$

式中: EX_{ij} 表示 j 类功能区的第 i 个网格单元的健身活力, 即因变量; β_{0j} 为常数项; X_{ij} 表示建成环境影响因素, W_j 则为功能类型影响因素; 回归系数 β_{1j} 表示建成环境要素对健身活力的影响, γ_{01} 和 γ_{11} 分别代表第二层方程斜率; γ_{00} 与 γ_{10} 分别代表第二层方程截距; e_{ij} 、 μ_{0j} 、 μ_{1j} 均为模型误差项。式(1)可检验建成环境要素与健身活力的关系, 而式(2)和(3)可检验功能类型对健身活力的影响, 以及功能类型如何调节建成环境与健身活力之间的关系。

1.3.3 多尺度地理加权回归(MGWR)

MGWR 是在地理加权回归 (geographically weighted regression, GWR) 的基础上提出的优化模型, 不仅能将变量的影响尺度分为全局和局部两类, 同时根据研究变量的数据分布特征允许各变量在不

同回归点上选取各自最优的带宽, 从而解决了不同变量尺度和带宽的问题, 在进行回归分析时能更好地反映差异化空间特征背景下变量的影响作用^[32]。已有研究通过对比 MGWR 模型与其他模型的解释结果, 证明了其解释力更强^[33]。具体公式为:

$$EX_i = \sum_{n=1}^N \alpha_{bw_n}(U_i, V_i) X_{ni} + \varepsilon_i \quad (4)$$

式中: EX_i 表示第 i 个网格单元的健身活力, bw_n 代表第 n 个自变量的带宽, (U_i, V_i) 为各个网格中心的坐标, X_{ni} 表示第 i 个网格单元的第 n 个自变量, $\alpha_{bw_n}(U_i, V_i)$ 表示在 (U_i, V_i) 处第 n 个自变量的回归系数; ε_i 为随机误差项。

2 结果分析

2.1 武汉主城区户外健身活力分布特征

2.1.1 健身活力分布格局

武汉市主城区内健身活力强度分布不均匀, 总

表 1 城市建成环境指标体系
Tab.1 Evaluation indicators of urban built environment

维度	建成环境变量	计算方法	计算公式	数据来源
土地利用	POI混合度	网格内不同类型POI占比相对值的熵, POI也分为居住、商业、工业、公共服务、休闲绿地5类	$Z_i = \frac{\text{全域第}i\text{类POI数量}}{\text{全域5类POI总数量}}$ $X_i = \frac{\text{网格单元第}i\text{类POI数量}}{\text{网格单元5类POI总数量}}$ $A_i = \frac{X_i}{Z_i}, P_i = \frac{A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \times 100\%$ $\text{POI混合度} = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n P_i \ln(P_i), n=5$	抓取自高德地图网站(https://lbs.amap.com/)
	绿化率	归一化植被指数(NDVI)	$\text{NDVI} = \frac{\text{近红外波段反射率} - \text{红光波段反射率}}{\text{近红外波段反射率} + \text{红光波段反射率}}$	地理空间数据云 Landsat 8数据(https://www.gscloud.cn)
	水系空间指数	网格中心点500 m缓冲区内水系面积占比	水系空间指数=水系面积/缓冲区内面积	全国基础地理数据库(https://www.webmap.cn)
密度	建筑密度	网格内建筑底面积占比	建筑密度=建筑轮廓面积/网格面积	获取自天地图(https://www.tianditu.gov.cn)
	容积率	建筑总面积与网格面积之比	容积率=建筑轮廓面积×建筑平均层数/网格面积	
街区设计	主次干道密度	国道、省道、城市主干路和高速路的长度与网格面积之比(m/km ²)	主次干道密度=道路长度/网格面积	
	城市支路密度	城市支路的长度与网格面积之比(m/km ²)	城市支路密度=道路长度/网格面积	
	道路交叉口密度	城市主要道路交叉口与网格面积之比(个/km ²)	交叉口密度=交叉口数量/网格面积	
设施可达性	运动场所密度	各类型POI数量与网格面积之比(个/km ²)	运动场所密度=POI数量/网格面积	抓取自高德地图网站(https://lbs.amap.com/)
	城市广场密度		城市广场密度=POI数量/网格面积	
	餐饮设施密度		餐饮设施密度=POI数量/网格面积	
	医疗设施密度		医疗设施密度=POI数量/网格面积	
	娱乐设施密度		娱乐设施密度=POI数量/网格面积	
交通可达性	地铁站密度	网格中心点500 m缓冲区内地铁站POI数量与网格面积之比(个/km ²)	地铁站密度=POI数量/网格面积	
	公交站点密度	网格中心点500 m缓冲区内公交站POI数量与网格面积之比(个/km ²)	公交站点密度=POI数量/网格面积	
空间品质	地价	街区平均地价(元)	地价=街区地价之和/街区数量	获取自贝壳网(https://www.ke.com/)

体上呈现核心—边缘结构。如图 5 所示,城区中心地段健身活力较外围地区明显更高,且组团集聚的特征明显,形成了多个中心地段高健身活力的“线状网格群”与外围边缘区低健身活力的“片状网格连绵区”。

对户外空间健身活力分布进行热点分析,冷热点分布整体上表现为“内热外冷”的空间分布格局(图 6)。具体而言,主城区内共有 14.34%的空间单元为热点区,主要分布在江滩公园、沙湖、东湖、南湖等水系周边,呈现出健身活力高度集聚的现象。另有 15.86%的空间单元为冷点区,且这几处冷点区

分别对应主城区内开发建设水平较低的地区,如汉阳区南侧四新地区及西侧龙阳湖周边、硚口区西北角与江岸区北部经济开发区、东湖南北两侧低开发水平地区等。

分别统计武汉主城区 6 类空间网格的健身活力强度的平均值,结果表明:不同功能类型空间健身活力差异巨大。如图 7 所示,绿地主导型、公共服务主导型空间中户外健身活力强度较大,居住主导型空间健身活力强度一般,而商业主导型与工业主导型最弱,体现了前 3 类功能主导空间中较多的公园绿地、城市绿道、体育场等设施建设优势;混合型空

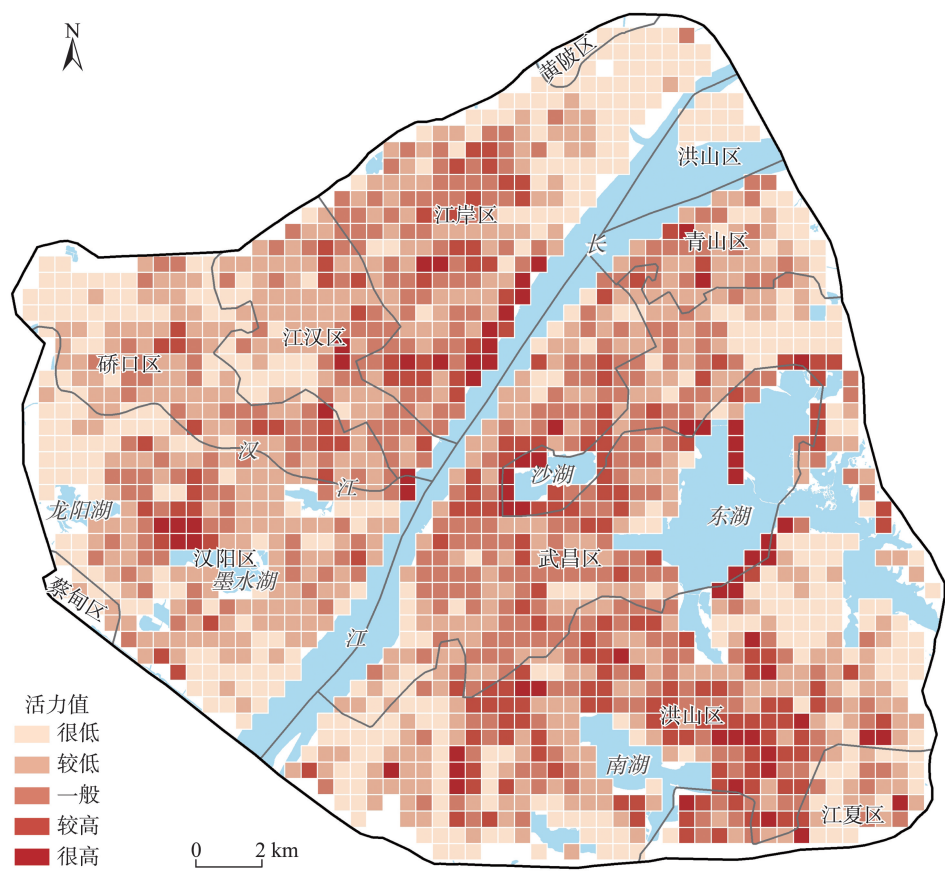


图5 武汉主城区户外健身活力强度分布格局

Fig.5 Spatial distribution of outdoor space fitness vitality in the Wuhan urban area

间总体上健身活力一般,其中又以居住绿地混合程度高的空间网格健身活力强度最大,而工业居住混合及其他混合较弱。整体上呈现出商业空间户外健身与工间健身缺口较大的问题。

2.1.2 健身活力分布聚类特征

武汉市主城区健身活力的Moran's *I*统计结果显示,数值全部通过1%的显著性水平检验,且Moran's *I*指数高达0.36,*z*得分为27.39,说明在武汉市主城区的户外空间健身活力分布并非随机,而是受建成环境、网格功能、空间区位等多重因素的影响,呈现出较高的聚类现象。

局部空间自相关的测度结果表明,武汉市主城区内健身活力的分布呈现出明显的空间自相关,形成了“高一高、高一低、低一高、低一低”4种不同的集聚组团(图8),但集聚组团以“高一高、低一低”为主,“高一低、低一高”两类集聚组团数量极少。健身活力分布呈现出“马太效应”,即空间分布上“高一高”聚类和“低一低”聚类两极分化现象明显。

2.2 户外健身活力的影响机制及其差异性

2.2.1 影响机制初步探究

利用SPSS 26统计分析软件,在确保各影响因素相关性显著且通过共线性检验的基础上,通过多元线性回归模型,计算土地利用、密度、街区设计、设施可达性、交通可达性、空间品质这6类建成环境特征对健身活力的总体影响,回归分析结果如表2模型一所示。由于人口规模与健身活力具有一定的双向因果关系,为了缓解模型内生性,同时计算了包含500 m服务范围内人口规模的模型回归结果(模型二)。模型一与模型二结果基本一致,建成环境变量的作用方向和显著度未受到明显影响,因而表2给出的回归结果具有稳健性。

线性回归结果显示,6类建成环境要素与健身活力具有显著相关性,且不同变量间差异较大(表2)。①从土地利用的影响来看,POI混合度与健身活力呈正向关联,设施类别越丰富的地区健身活力也越高;绿化率与水系空间指数也对健身活力呈显著正相关,表明城市居民更加倾向于在自然条件优

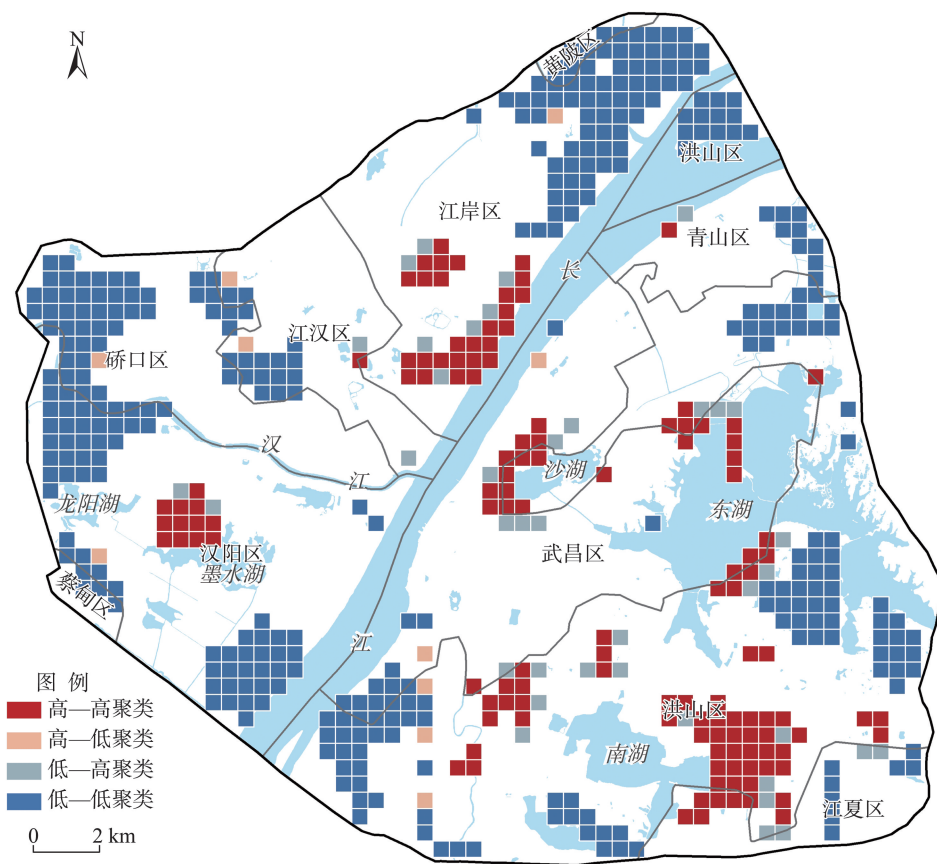


图8 武汉主城区健身活力局部空间集聚特征

Fig.8 LISA agglomeration of fitness vitality in the Wuhan urban area

表2 健身活力影响因素相关性分析结果

Tab.2 Results of correlation analysis of fitness vitality influencing factors

影响要素	变量	模型一 (解释变量未纳入人口要素)		模型二 (解释变量纳入人口要素)	
		标准化系数	标准误差	标准化系数	标准误差
土地利用	POI混合度	0.111**	0.172	0.109**	0.171
	绿化率	0.207***	0.175	0.217***	0.174
	水系空间指数	0.063***	0.006	0.059**	0.006
密度	建筑密度	-0.062*	0.016	-0.103***	0.017
	容积率	0.138***	0.041	0.139***	0.041
街区设计	主次干道密度	-0.007	0.009	-0.008	0.009
	城市支路密度	0.446***	0.057	0.452***	0.056
	道路交叉口密度	0.057*	0.025	0.061**	0.025
设施可达性	运动场所密度	0.062**	0.022	0.060**	0.021
	城市广场密度	-0.003	0.023	-0.023	0.034
	餐饮设施密度	-0.004	-0.006	0.012	0.026
	医疗设施密度	0.013	0.024	-0.027	0.025
	娱乐设施密度	0.032	0.026	0.034	0.025
交通可达性	地铁站密度	-0.065**	0.015	-0.075***	0.015
	公交站点密度	0.169*	0.034	0.111	0.037
空间品质	地价	0.245***	0.132	0.246***	0.131
500 m范围内人口规模				0.136***	0.036

注: *, **, ***分别表示 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 、 $P<0.001$, 下同; 模型一、二的调整后 R^2 分别为 0.538、0.545。

疗设施、娱乐设施的影响作用不明显。较为意外的是,城市广场与健身活力相关性不显著,这可能是由于武汉主城区内的广场设施与慢行系统未有效结合,城市广场没有发挥出促进居民健身活动的作用。⑤ 交通可达性方面,地铁站密度与健身活力显著负相关,可能由于地铁站主要沿城市交通干线布置,且靠近重大设施与人流集聚地,较高的车流量、人流量对居民健身活动有消极作用。模型一中公交站点密度在5%的显著性水平下呈正相关,但在模型二中影响并不显著,表明此结果主要受人口因素的影响。⑥ 地价与健身活力为显著正相关,这可能是地价水平越高的地区,健身环境越舒适,配套设施越齐全,健身活力也越高。

2.2.2 影响机制在功能维度上的差异性

为验证网格功能类型对户外空间健身活力的影响不可忽视,本文在不添加任何自变量的情况下构建空模型(表3),估计结果显示,健身活力在城市

不同功能类型空间上的组间效应较为明显,功能层次间关联度系数(ICC)为22.05%,即健身活力中约22%的变异来自于功能特征层面,这说明网格的功能类型对健身活力的影响不可忽略(超过Cohen的经验标准14%)。

由于健身活力在城市不同功能类型空间上的组间效应不可忽视,因此进一步采用多层线性模型(HLM),探究建成环境要素对不同功能类型空间上户外健身活力影响效果的显著差异性。通过创建功能类型虚拟变量,将网格单元层面的建成环境变量与功能分区层面的功能类型变量逐次纳入模型,并构建网格功能与建成环境要素的交互作用项,分别单独进行HLM回归分析。由表4结果可知,功能特征虽未明显改变建成环境要素的作用方向,但除绿化率系数增大、地铁站密度系数不变外,其他回归系数均有所降低,进一步表明网格功能特征对健身活力的显著影响。同时,各功能类型相对于工

表3 空模型的估计结果
Tab.3 Estimated results of the null model

	参数	变异数平方和	F 检验	显著性
随机效应	功能类别间变异(组间变异)	786.958	72.309	$P<0.001$
	网格单元间变异(组内变异)	3569.714		
组间关联度系数(ICC)		22.05%		

表4 HLM分析及交互项回归结果
Tab.4 HLM analysis and interaction term regression results

变量名	标准化系数	标准误差	变量名	标准化系数	标准误差
网格单元层面:建成环境要素			交互作用项:建成环境要素×功能类型要素		
POI混合度	0.070 [*]	0.171	POI混合度×公共服务主导型	-0.153 ^{**}	0.071
绿化率	0.219 ^{***}	0.179	POI混合度×工业主导型	0.044 ^{**}	0.021
水系空间指数	0.049 [*]	0.006	绿化率×工业主导型	-0.300 ^{***}	0.102
建筑密度	-0.090 ^{***}	0.017	水系空间指数×绿地主导型	0.163 ^{***}	0.073
容积率	0.131 ^{***}	0.041	建筑密度×绿地主导型	-0.171 ^{**}	0.101
城市支路密度	0.427 ^{***}	0.056	容积率×居住主导型	0.078 ^{**}	0.026
道路交叉口密度	0.056 ^{**}	0.025	城市支路密度×居住主导型	0.075 ^{**}	0.032
运动场所密度	0.056 ^{**}	0.021	运动场所密度×商业主导型	-0.051 [*]	0.020
地铁站密度	-0.075 ^{***}	0.015	运动场所密度×绿地主导型	0.199 ^{***}	0.056
地价	0.235 ^{***}	0.131	地铁站密度×公共服务主导型	0.065 [*]	0.025
人口规模	0.131 ^{***}	0.036	地价×公共服务主导型	-4.381 ^{**}	0.832
功能分区层面:功能类型要素			地价×商业主导型	-2.341 [*]	0.679
居住主导型	0.246 ^{***}	0.112	地价×工业主导型	2.501 [*]	0.825
公共服务主导型	0.169 ^{***}	0.125	人口规模×绿地主导型	1.149 ^{***}	0.755
商业主导型	0.067 ^{**}	0.172			
混合型	0.067 ^{***}	0.17			
绿地主导型	0.085 ^{**}	0.143			

注:HLM模型的调整后R²为0.560;功能类型要素中,各变量以“工业主导型”为参照变量;表中未展示不显著的其他变量及交互项结果。

业主导型对健身活力的影响都为正向,且部分网格功能与建成环境要素的交互项通过了5%的显著性水平检验,表明户外空间健身活力的影响机制在不同功能维度上具有异质性。

从交互项的回归结果看,除混合型空间单元外,建成环境要素对各类型空间单元健身活力的影响具有显著差异性。①首先,POI混合度和工业主导型功能空间的交互项与健身活力显著正相关,表明适当丰富工业主导型空间单元的设施类型相较于其他类别空间更能有效提升健身活力;相反,POI混合度与公共服务主导型功能空间的交互作用显著负相关,表明提升公共服务主导型片区的POI混合度,会导致此类空间健身活力增加的可能性较其他类别空间显著降低,这可能是由于外部POI吸引力过高降低了居民健身意愿,导致健身活力下降,与相关研究中所持观点类似^[15]。②绿化率的提升作用在整体水平上较为显著,但对工业主导型空间而言,两者的交互项回归系数为负值,表明绿化率对此类空间健身活力的提升效果有所下降,甚至呈负相关。③水系空间指数与绿地主导型功能空间的交互作用为正,表明提升亲水性对公园绿地的健身活力的促进作用尤为明显。④在密度方面,增加容积率对居住主导型功能空间内健身活力的提升作用较其他类别空间更加显著。⑤街区设计方面,提高城市支路密度对促进居住主导型功能空间健身活力的效果更为显著,说明低等级道路更有利于城市居民就近开展健身活动。⑥在设施布局方面,

运动设施与绿地主导型功能空间的结合效果更好,但与商业主导型功能空间的结合效果较差;地铁站密度在整体上会抑制健身活力,但对公共服务主导型空间而言,两者的交互项回归系数变为正值,表明地铁站提升了公共服务设施的可达性,一定程度上提高了居民的健身意愿。⑦地价与公共服务主导型空间单元的交互作用为负,可能的原因是高地价区域社区内部及其周边提供了较好的室内外健身空间,且地价并不与公共空间品质提升必然相关;同样,地价与商业主导型空间单元的交互作用也为负,说明高档商业空间也不利于户外健身;而地价与工业主导型功能空间的交互作用为显著正相关,可能是由于地价较高的工业园空间质量相对更高,更有利于开展健身活动,因此促进作用明显。⑧在人口规模方面,绿地主导型功能空间500 m服务范围内的人口规模越大,对健身活力的促进作用越明显,表明邻近居住区的公园绿地更有利于促进居民健身。这些结果表明,建成环境对健身活力的影响不仅存在独立效应,而且其作用效果还会因网格功能属性不同存在差异。

2.2.3 影响机制在空间区位上的差异性

进一步探究不同空间区位下建成环境对健身活力的影响。将模型二中各建成环境变量与人口变量纳入MGWR模型,总体拟合度调整后 R^2 值为0.749,能取得更接近于真实值的拟合效果。分别选取建成环境要素中显著度较高的变量,并统计各要素影响系数的四分位数及正负值占比(表5)。

表5 MGWR模型回归系数的描述性统计
Tab.5 Descriptive statistics of the regression coefficients of the MGWR model

变量	最小值	下四分位数	中位数	上四分位数	最大值	负值占比/%	正值占比/%	通过检验的网格占比/%
POI混合度	-0.20	0	0.08	0.16	0.41	24.06	75.94	100
城市支路密度	0.14	0.26	0.35	0.43	0.65	0	100	100
主次干道密度	-0.08	-0.04	-0.03	-0.01	0.22	86.07	13.93	67
建筑密度	-0.15	-0.10	-0.09	-0.05	0.00	100	0	100
绿化率	-0.43	0.14	0.20	0.26	0.57	12.01	87.99	56
地价	0.18	0.21	0.22	0.22	0.30	0	100	100
运动设施密度	0.04	0.05	0.06	0.09	0.11	0	100	100
道路交叉口密度	0.02	0.03	0.04	0.05	0.07	0	100	100
水系空间指数	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0	100	100
容积率	0.22	0.22	0.22	0.23	0.23	0	100	100
地铁站密度	-0.07	-0.06	-0.05	-0.05	-0.05	100	0	9
公交站点密度	-0.15	-0.11	0.07	0.13	0.15	46.10	53.90	14
500 m范围内人口规模	-0.35	0.10	0.14	0.21	0.48	8.12	91.88	70

注:“通过检验的网格占比”指在 $P<0.05$ 显著水平下通过检验的空间单元数占比。

MGWR 模型拟合结果中,城市广场密度、餐饮设施密度、医疗设施密度、娱乐设施密度与健身活力基本不相关,地铁站密度、公交站点密度与健身活力的相关性也很低,仅少量空间单元在 $P<0.05$ 的显著水平下通过检验。地价、运动设施密度、道路交叉点密度、水系空间指数、容积率对健身活力为正向相关,且影响机制的空间差异较小;POI 混合度、城市支路密度、主次干道密度、建筑密度、绿化率及人口规模对健身活力影响机制的差异特征明显(图9),这表明建成环境对健身活力的影响效果因所处的空间区位不同而存在差异。

POI 混合度对健身活力的影响总体上呈现“内抑外促”,越靠近武汉主城区外围地段正向效应越明显,中心地区反而有所抑制。江岸区北侧开发强度较低区域、主城区东南角产业园区的回归系数为

正值,表明POI混合度对此空间健身活力的促进作用较为显著,这也与前文研究结论相呼应。沿江两岸的江滩公园、南湖北岸等城市中心区及东湖沿湖地段的POI混合度则与健身活力呈负相关,表明城市中心区或滨水区周边设施的丰富程度,会降低居民开展健身活动的可能性。硚口区西北角长丰大道两侧地区POI混合度与健身活力呈负向相关,与主城区外围其他地段的影响作用相反。

城市支路密度在武汉主城区全域范围内都呈现显著正相关,且主城区西侧、南湖西侧、沙湖与东湖北侧、主城区东南角地区的回归系数相对其他区域更高。相比其他建成环境要素,实证研究中仅城市支路密度对健身活力的促进作用在中心地段有较为显著的提升。主次干道密度在主城区不同位置的作用效果呈现两极分化,总体上与健身活力呈

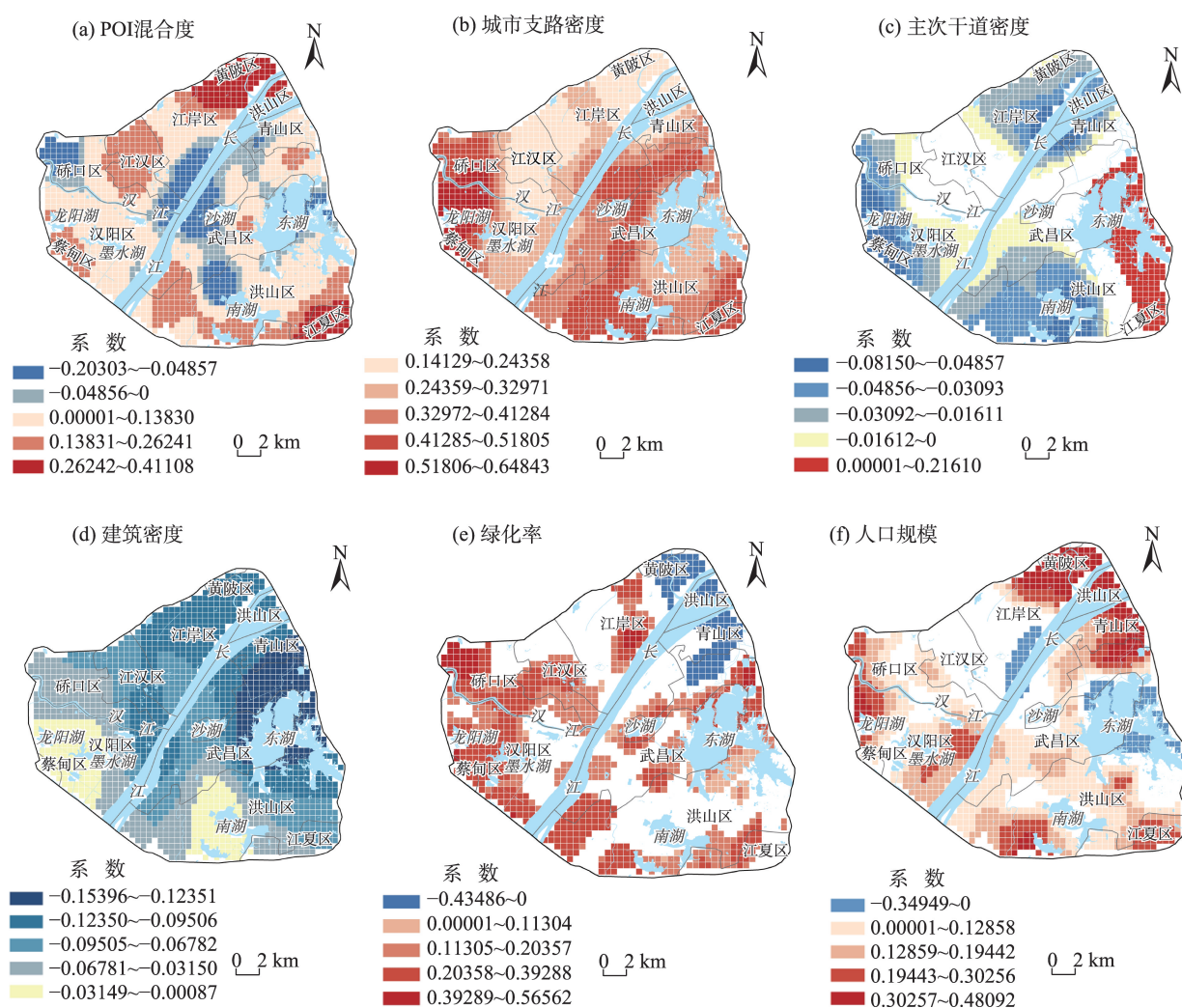


图9 异质性较强的部分回归模型系数分布

Fig.9 Spatial distribution of partial regression coefficients with strong heterogeneity

现负向相关,尤其是主城区西侧、北侧及南湖周边地区负向作用明显,部分地段主次干道密度与健身活力的相关性不强。而在主城区东侧支路网密度较低的区域,适度的高级道路同样能促进居民健身。

建筑密度在武汉主城区范围内都呈显著负相关,且负向效应较强的地区主要沿长江两岸、东湖北侧及周边地区分布,而汉阳区及南湖周边地区的建筑密度对健身活力的负向影响则相对较小。

绿化率对健身活力的影响总体上为正向相关,但部分地区显著性不高。绿化率正向影响的地区主要分布在亲水区,表明蓝绿空间作为城市当中相对稀缺的空间资源,两者的结合能显著激发居民的健身意愿。主城区北部绿化率与健身活力负向相关,可能是由于该地区人口较少,开发建设活动尚未开展,建成环境品质较差,绿色空间难以转化为居民健身空间,因此对健身活力的促进作用相对较弱。

空间单元的服务人口越多,总体上与健身活力呈显著正相关,其中江岸区北部、墨水湖东南侧、东湖北侧、主城区西部及中南部地区回归系数较高,表明大多数地区的人口规模越大,健身活力越高。但局部地区也存在负向效应,江滩公园、东湖周围地区人口规模较少,但作为全市极为重要的休闲活动场地,服务对象面向全市居民,在回归结果上则表现为健身活力与周边地区人口规模呈显著负相关。

2.3 优化建议

本文在进行机制挖掘时基于城市规划重点关注的功能和空间布局两大维度展开,对提升武汉主城区健身活力、打造健身友好型城市空间具有针对性指导价值与现实意义。

功能布局方面:① 引导城市功能多样化改造。由于设施功能混合度对提升健身空间活力有显著作用,因此可通过构建混合多样的用地模式,引导社区功能的多样化改造,提升居民生活空间的功能多样性。② 推动产城融合。设施功能混合度、空间品质对工业型空间单元健身活力的正向影响更加显著,因此需进一步驱动城市更新和完善服务配套,增强园区生活服务能力,引导落实工间健身,提升园区生产环境与空间品质,促进园区、城市的空间互动。③ 提高城市公共服务能力。设施功能混合度对公共服务型空间单元的健身活力提升存在不利影响,而地铁站密度对该功能空间的抑制作用

则相对更低。因此需提高大型公共服务设施的可达性,同时避免要素过度集聚。④ 改善绿地的游憩与健身环境。本文发现运动场所密度与水系空间指数对公园绿地型空间单元的促进作用更加明显,因此结合水体打造公园绿地等城市大型开敞空间,并配套设置运动场所与健身设施,丰富绿地公园的景观环境与健身功能,可引导城市居民积极参与健身活动^[35]。

空间组织方面:① 疏解核心区功能,提升边缘地区服务能级。MGWR模型结果显示城市核心区POI混合度与健身空间活力负向相关,而边缘地区则呈正向影响。因此,通过疏解城市核心地区功能,可以避免城市功能过度集聚对健身活动产生的消极影响;同时完善城区边缘地区配套设施,提高设施混合度,改善城区边缘健身空间的环境品质。② 打造小街区、密路网的紧凑型街区模式。MGWR模型结果显示,支路密度对城市核心区健身空间活力的正向影响较强,应当打造小街区、密路网的紧凑型街区模式,提高城市支路密度,保障低等级道路的步行、骑行空间,破除“大街道”对行人与非机动车路权的阻碍。③ 保障滨水区生态景观环境。MGWR模型结果显示,绿化率对城市滨水区健身空间活力具有显著正向影响,因此,可进一步提高城市绿化水平,保障山水空间格局,并结合武汉主城区山水特征,巩固串联各个生态绿楔,打造“山—水—城”相互融合的生态之城。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文基于武汉市主城区建成环境、Keep健身等多源大数据,面向健身友好型城市的功能及形态布局,探究了城市建成环境对健身活力的影响机制及基于功能、空间维度的异质性特征。主要得出以下结论:

(1) 武汉主城区户外空间健身活力分布不均且呈组团集聚,城区外围健身活力较低。建成环境对健身活力具有显著影响,POI混合度、绿化率、水系空间指数、容积率、城市支路密度、道路交叉口密度、运动设施密度、空间品质对健身活力都有正向影响,建筑密度与地铁站密度对健身活力为负向影响。

建成环境对户外空间健身活力的影响存在异

质性,且与网格功能、空间区位密切相关。

(2) 从功能维度看,POI混合度、空间品质对工业主导型空间健身活力的正向影响更为显著;运动场所密度与水系空间指数对绿地主导型空间的正向作用更加明显;城市支路密度、容积率则对居住主导型空间的正向作用更为显著。

(3) 从空间维度看,武汉主城核心区健身活力受POI混合度的负向影响,主次干道密度总体上也呈负向,而受支路密度的正向影响明显;外围区健身活力受POI混合度的正向促进作用,部分外围地区提高绿化率和道路密度也能增强健身活力;滨水区健身活力受绿化水平的正向影响明显,而建筑密度与POI混合度则对部分滨水区健身活力的抑制作用更明显。

3.2 讨论

(1) 本文从空间活力的视角出发,通过利用Keep健身轨迹大数据,对城市居民户外健身活动行为进行精确描述,以此探究武汉主城区户外空间健身活力强度分布,并挖掘城市建成环境要素的影响机制。研究范围从单一类型、特定空间转向主城区全域各类型户外健身空间,回应城市居民健身需求的空间拓展,将沿街健身、社区健身、工间健身等的健身“新空间”也纳入研究范畴,避免了以往研究中普遍忽视“非正规”健身空间的问题。

(2) 通过采用多层线性模型与多尺度地理加权回归等分析方法,从功能维度挖掘城市建成环境要素在居住、商业、绿地、公共服务等6类空间单元中对健身活力影响的差异性,从空间维度挖掘建成环境在城市外围区、滨水区、核心区等不同区位条件下对健身活力影响的差异性,解决了以往研究中缺乏以城市功能属性、空间区位多重异质性的讨论缺陷,为后续户外空间健身活力及其影响机制的研究提供新的方法和思路。

(3) 研究仍存在一定不足之处。由于网格单元内功能复杂,健身活力与单元内各功能地块的关系并不明确,且对网格单元进行类型划分时忽视了功能地块对健身活力的综合影响。另外,本文涉及的空间尺度较大,缺乏对单一类型空间健身活力的影响机制的深入探讨;对人群属性的探究也不足。在后续研究中,将进一步细化功能单元的划分方式,挖掘城市建成环境、人的属性对健身活力的综合影响,并基于典型地区开展实验论证,提升研究的可靠性与实用价值。

参考文献(References)

- [1] 赵海莉,李家亮,李开丽,等. 基于不同尺度的中国运动健身场所空间差异及影响因素研究[J]. 干旱区地理, 2022, 45(6): 1938-1948. [Zhao Haili, Li Jialiang, Li Kai-li, et al. Spatial differences and influencing factors of stadia and fitness centers at different scales in China. Arid Land Geography, 2022, 45(6): 1938-1948.]
- [2] 张建波,李诚固,刘伟,等. 长春市健身空间的演变特征、类型与影响因素[J]. 地域研究与开发, 2019, 38(1): 71-75, 80. [Zhang Jianbo, Li Chenggu, Liu Wei, et al. Spatial characteristics, pattern and influencing factors of fitness spaces in Changchun City. Areal Research and Development, 2019, 38(1): 71-75, 80.]
- [3] 姜玉培,甄峰,王文文,等. 城市建成环境对居民身体活动的影响研究进展与启示[J]. 地理科学进展, 2019, 38(3): 357-369. [Jiang Yupei, Zhen Feng, Wang Wenwen, et al. Influence of urban built environment on residents' physical activity: Review and implications. Progress in Geography, 2019, 38(3): 357-369.]
- [4] Cervero R, Kockelman K. Travel demand and the 3Ds: Density, diversity, and design [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 1997, 2(3): 199-219.
- [5] Ewing R, Cervero R. Travel and the built environment [J]. Journal of the American Planning Association, 2010, 76(3): 265-294.
- [6] 许婧雪,谌丽,张文忠. 建成环境是否影响居民健康生活方式? 基于北京22个社区的实证分析[J]. 地理科学进展, 2021, 40(4): 660-670. [Xu Jingxue, Chen Li, Zhang Wenzhong. Does the built environment impact residents' healthy lifestyle? Empirical analysis based on 22 communities in Beijing. Progress in Geography, 2021, 40(4): 660-670.]
- [7] 魏越,杨东峰. 邻里目的地建成环境对老年日常活动机会的影响: 基于感知和参与视角[J]. 地理科学进展, 2023, 42(1): 89-103. [Wei Yue, Yang Dongfeng. Impact of neighborhood destination built environments on daily activity opportunities of the elderly population: Based on perception and participation. Progress in Geography, 2023, 42(1): 89-103.]
- [8] 张延吉,陈小辉,赵立珍,等. 城市建成环境对居民体力活动的影响: 以福州市的经验研究为例[J]. 地理科学, 2019, 39(5): 779-787. [Zhang Yanji, Chen Xiaohui, Zhao Lizhen, et al. The impact of urban built environment on residents' physical activity: Based on the empirical research in Fuzhou city. Scientia Geographica Sinica, 2019, 39(5): 779-787.]

- [9] Troped P J, Tamura K, McDonough M H, et al. Direct and indirect associations between the built environment and leisure and utilitarian walking in older women [J]. *Annals of Behavioral Medicine*, 2017, 51(2): 282-291.
- [10] 翟宇佳, 黎东莹, 王德. 社区公园对老年使用者体力活动参与和情绪改善的促进作用: 以上海市15座社区公园为例 [J]. *中国园林*, 2021, 37(5): 74-79. [Zhai Yujia, Li Dongying, Wang De. The role of urban community park in promoting seniors' physical activity and positive emotion: A case study of 15 Shanghai community parks. *Chinese Landscape Architecture*, 2021, 37(5): 74-79.]
- [11] 王兰, 张雅兰, 邱明, 等. 以体力活动多样性为导向的城市绿地空间设计优化策略 [J]. *中国园林*, 2019, 35(1): 56-61. [Wang Lan, Zhang Yalan, Qiu Ming, et al. Improvement strategy of urban green space design for the diversity of physical activity. *Chinese Landscape Architecture*, 2019, 35(1): 56-61.]
- [12] 赵晓龙, 侯韞婧, 邱璇, 等. 基于走跑类运动容量的城市公园园路形态特征研究: 以哈尔滨为例 [J]. *中国园林*, 2019, 35(6): 12-17. [Zhao Xiaolong, Hou Yunjing, Qiu Xuan, et al. The study on morphological characteristics of pathway in urban parks based on walking and running capacity: A case of Harbin City. *Chinese Landscape Architecture*, 2019, 35(6): 12-17.]
- [13] 谢波, 伍蕾, 王兰. 基于自然实验的城市绿道对居民中高强度体力活动的影响研究 [J]. *风景园林*, 2021, 28(5): 30-35. [Xie Bo, Wu Lei, Wang Lan. Exploring the intervention effect of urban greenways on moderate-to-vigorous physical activities of residents: A study based on natural experiment. *Landscape Architecture*, 2021, 28(5): 30-35.]
- [14] 侯韞婧, 孙月, 赵艺, 等. 运动健康视角下居住街坊绿地评价及更新研究: 以哈尔滨老工业区为例 [J]. *南方建筑*, 2022(8): 65-72. [Hou Yunjing, Sun Yue, Zhao Yi, et al. Evaluation and renewal of residential neighborhood green space from the perspective of sports health: A case study of old industrial area in Harbin. *South Architecture*, 2022(8): 65-72.]
- [15] 郑权一, 赵晓龙, 金梦潇, 等. 基于POI混合度的城市公园体力活动类型多样性研究: 以深圳市福田区为例 [J]. *规划师*, 2020, 36(13): 78-86. [Zheng Quanyi, Zhao Xiaolong, Jin Mengxiao, et al. A study on diversity of physical activities in urban parks based on POI mixed-use: A case study of Futian District, Shenzhen. *Planners*, 2020, 36(13): 78-86.]
- [16] 吕飞, 师鑫雨, 戴铜. 格林模式视角下社区休闲性体力活动影响因素研究: 以哈尔滨七个典型社区为例 [J]. *西部人居环境学刊*, 2022, 37(6): 43-51. [Lv Fei, Shi Xinyu, Dai Jian. Study on influencing factors of community leisure physical activity from the perspective of Precede-Proceed model: Taking seven typical communities in Harbin as examples. *Journal of Human Settlements in West China*, 2022, 37(6): 43-51.]
- [17] 董雯, 朱逊, 赵晓龙. 社区绿道建成环境特征与体力活动强度关联性研究: 以深圳市为例 [J]. *风景园林*, 2021, 28(12): 93-99. [Dong Wen, Zhu Xun, Zhao Xiaolong. Research on correlation between built environment characteristics of community greenway and intensity of physical activities: A case study of Shenzhen. *Landscape Architecture*, 2021, 28(12): 93-99.]
- [18] 王厚雷, 王竹影, 朱建勇, 等. 我国城市社区建成环境对社区老年居民的户外体力活动及身体健康自我评价的影响: 以南京市为例 [J]. *首都体育学院学报*, 2020, 32(6): 570-576. [Wang Houlei, Wang Zhuying, Zhu Jianyong, et al. Impact of urban community built environment on outdoor physical activity and self-assessment of physical health of the elderly in China: Taking Nanjing as an example. *Journal of Capital University of Physical Education and Sports*, 2020, 32(6): 570-576.]
- [19] 杨春, 谭少华, 李梅梅, 等. 健康城市主动式规划干预途径研究 [J]. *城市规划*, 2022, 46(11): 61-76. [Yang Chun, Tan Shaohua, Li Meimei, et al. Research on active planning intervention strategies for healthy cities. *City Planning Review*, 2022, 46(11): 61-76.]
- [20] 陈菲, 周素红, 张琳. 生命周期视角下建成环境对居民休闲体力活动的影响 [J]. *世界地理研究*, 2019, 28(5): 106-117. [Chen Fei, Zhou Suhong, Zhang Lin. Influence of built environment on residents' leisure time physical activity from the perspective of life cycle. *World Regional Studies*, 2019, 28(5): 106-117.]
- [21] 秦波, 张悦. 城市建成环境对居民体力活动强度的影响: 基于北京社区问卷的研究 [J]. *城市发展研究*, 2019, 26(3): 65-71. [Qin Bo, Zhang Yue. The effects of urban built environment on residents' physical activity: A study on neighborhood survey in Beijing. *Urban Development Studies*, 2019, 26(3): 65-71.]
- [22] 朱玮, 翟宝昕. 城市建成环境认知对儿童户外活动的影晌: 模型建构及上海的实证 [J]. *城市规划*, 2019, 43(12): 45-54. [Zhu Wei, Zhai Baoxin. Influence of urban built environment cognition on children's outdoor activities. *City Planning Review*, 2019, 43(12): 45-54.]
- [23] 黄邓楷, 袁磊. 跑步频率与街区环境特征关联研究: 基于街景图片和公众参与地理信息系统视角 [J]. *南方建筑*, 2023(4): 69-78. [Huang Dengkai, Yuan Lei. The correlation between running frequency and environmental characteristics: A case study from the perspective of

- street view images and public participation GIS. *South Architecture*, 2023(4): 69-78.]
- [24] 林岚, 张雪, 刘群, 等. 大型体育场馆对城市居民休闲体育行为时空规律的影响研究: 以国内三个城市为例 [J]. *人文地理*, 2022, 37(1): 116-125. [Lin Lan, Zhang Xue, Liu Qun, et al. The influence of large-scale stadiums on the space-time pattern of urban residents' recreational sports behavior: A case of three cities in China. *Human Geography*, 2022, 37(1): 116-125.]
- [25] 王依明. 健康支持性环境对城乡居民规律性体力活动的影响: 基于社会生态学的视角 [J]. *现代城市研究*, 2021(10): 111-117. [Wang Yiming. The impact of health-supportive environment on regular physical activity among urban and rural residents in China, using social ecology as a theoretical framework. *Modern Urban Research*. 2021(10): 111-117.]
- [26] 张延吉, 邓伟涛, 赵立珍, 等. 城市建成环境如何影响居民生理健康? 中介机制与实证检验 [J]. *地理研究*, 2020, 39(4): 822-835. [Zhang Yanji, Deng Weitao, Zhao Lizhen, et al. How urban built environment affects residents' physical health? Mediating mechanism and empirical test. *Geographical Research*, 2020, 39(4): 822-835.]
- [27] 李康康, 杨东峰. 城市建成环境如何影响老年人体力活动: 模型构建与大连实证 [J]. *人文地理*, 2021, 36(5): 111-120. [Li Kangkang, Yang Dongfeng. How does the urban built environment affect the physical activities of the elderly: Model construction and Dalian demonstration. *Human Geography*, 2021, 36(5): 111-120.]
- [28] 祝朝阳, 郑善文, 甄冉, 等. 基于运动轨迹数据的健康街道环境优化研究: 以北京核心区为例 [J]. *规划师*, 2023, 39(7): 72-79. [Zhu Chaoyang, Zheng Shanwen, Zhen Ran, et al. The optimization of healthy street environment based on sports tracking data: A case study of Beijing core area. *Planners*, 2023, 39(7): 72-79.]
- [29] 董冠鹏, 张航, 郭雨臣. 基于空间计量模型的城市网络外部性定量测度 [J]. *地理研究*, 2023, 42(2): 495-513. [Dong Guanpeng, Zhang Hang, Guo Yuchen. Urban network externality modelled through spatial econometric models. *Geographical Research*, 2023, 42(2): 495-513.]
- [30] Ye Y, Li D, Liu X J. How block density and typology affect urban vitality: An exploratory analysis in Shenzhen, China [J]. *Urban Geography*, 2018, 39(4): 631-652.
- [31] Gong P, Chen B, Li X C, et al. Mapping essential urban land use categories in China (EULUC-China): Preliminary results for 2018 [J]. *Science Bulletin*, 2020, 65: 182-187.
- [32] 沈体雁, 于瀚辰, 周麟, 等. 北京市二手住宅价格影响机制: 基于多尺度地理加权回归模型(MGWR)的研究 [J]. *经济地理*, 2020, 40(3): 75-83. [Shen Tiyan, Yu Hanchen, Zhou Lin, et al. On hedonic price of second-hand houses in Beijing based on multi-scale geographically weighted regression: Scale law of spatial heterogeneity. *Economic Geography*, 2020, 40(3): 75-83.]
- [33] 凡来, 张大玉. 北京街区活力影响机制及空间分异特征研究: 基于多尺度地理加权回归 [J]. *城市规划*, 2022, 46(5): 27-37. [Fan Lai, Zhang Dayu. Research on the influence mechanism and spatial heterogeneity characteristics of block vitality in Beijing: Based on multi-scale geographically weighted regression. *City Planning Review*, 2022, 46(5): 27-37.]
- [34] 翁锡全, 张莹, 林文弢. 城市化进程中居民体力活动变化及其对健康的影响 [J]. *体育与科学*, 2014, 35(1): 35-40. [Weng Xiquan, Zhang Ying, Lin Wentao. Residents' physical activity transition and its health effects in urbanization process. *Sports & Science*, 2014, 35(1): 35-40.]
- [35] 魏伟, 周婕, 罗玛诗艺. “城市人”视角下社区公园满意度分析及规划策略: 以武汉市武昌区中南路街道为例 [J]. *城市规划*, 2018, 42(12): 55-66. [Wei Wei, Zhou Jie, Luo Mashiyi. Analysis on satisfaction and planning strategy of community parks from the perspective of homourbanicus: A case study of Zhongnan Road area in Wuchang District, Wuhan. *City Planning Review*, 2018, 42(12): 55-66.]

Influence of the built environment on outdoor space fitness vitality and its heterogeneity: A case study of the Wuhan urban area

WEI Wei^{1,2,3}, ZHANG Yang¹, HONG Mengyao^{1,3*}, XIA Junnan¹

(1. School of Urban Design, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. China Institute of Development Strategy and Planning, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

3. Hubei Habitat Environment Research Centre of Engineering and Technology, Wuhan 430072, China)

Abstract: Exploring the mechanism of impact of the built environment on fitness vitality in urban outdoor spaces is of great significance for promoting national fitness. Taking the Wuhan urban area as an example, this study investigated the intensity of fitness vitality in outdoor spaces based on Keep fitness trajectory data. The hierarchical linear modeling (HLM) and multiscale geographically weighted regression (MGWR) models were employed to analyze the influence of the built environment on fitness vitality and its spatial variations. The results reveal the following: 1) Significant differences exist in fitness vitality among different functional areas. Green-dominated spaces exhibit the highest fitness vitality, with density of sports facilities and water area coefficient playing a more pronounced role in promoting fitness in such areas. Residential-dominated spaces also demonstrate considerable fitness vitality, with more prominent positive effects from street density and floor area ratio. In contrast, industrial-dominated spaces exhibit the weakest fitness vitality, while the degree of point of interest (POI) mixture and land prices show significant positive effects in such areas. 2) There are substantial disparities in fitness vitality among different locations, generally exhibiting a core-periphery structure with evident clustering characteristics. Moreover, the influences of POI mixture, road density, building density, and green space ratio vary significantly across different locations. The research findings demonstrate the multifaceted impact of the urban built environment on outdoor space fitness vitality and provide valuable planning recommendations for optimizing city functionality and form to create fitness-friendly environments.

Keywords: built environment; fitness vitality; mechanism of influence; heterogeneity; Wuhan City