

基于改进3SFCA的杭州主城区体育场馆可达性研究*

Accessibility Study of Hangzhou's Main Urban Sports Venues Based on an Improved 3SFCA Model

陈博文 张钧韦 鲍沁星 陈丹秀 CHEN Bowen, ZHANG Junwei, BAO Qinxing, CHEN Danxiu

摘要 体育场馆是城市公共设施的重要组成部分,相较于户外运动场所,其具有环境稳定舒适等优势,对全民健身具有重要意义。以杭州市主城区为例,在对3SFCA(三步移动搜索法)中距离衰减函数、人口需求点、服务能力指标和搜寻半径进行优化的基础上,对各级体育场馆在多种出行方式下的可达性进行测度研究。结果表明:(1)大型场馆可达性表现最佳,中型场馆可达性存在供需错位,小型场馆可达性显著不足;(2)主城区内场馆可达性与人口分布匹配度较低,高人口区域可达性多数低于平均水平;(3)交通方式上车行可达性最佳并依赖放射状路网,公交地铁可达性地区差异显著,骑行可达性在特定区域高值集中,步行可达性显著不足。最后提出体育场馆布局与选址的优化建议。

Abstract As a critical component of urban public infrastructure, sports venues offer stable environments, significantly contributing to public fitness promotion. Focusing on Hangzhou's main urban area, this study refines the 3SFCA method by optimizing distance decay functions, demand points, service capacity metrics, and search radii to evaluate the multimodal accessibility of hierarchical sports facilities. Key findings indicate: (1) tiered accessibility disparities, with large venues achieving optimal accessibility, medium-sized facilities showing moderate accessibility with supply-demand mismatches, and small venues exhibiting notable deficiencies; (2) spatial mismatch between supply and demand in the core urban area, where accessibility in most high-density population zones falls below average; and (3) distinct modal characteristics in accessibility, with the highest performance in car travels via radial road networks, uneven public transit coverage, localized cycling accessibility hotspots, and insufficient pedestrian access. Finally, this paper proposes suggestions for optimizing sports venue layout and site selection.

关键词 体育场馆;可达性;三步移动搜索法;杭州市

Key words sports venues; accessibility; three-step floating catchment area method; Hangzhou

文章编号 1673-8985 (2026) 01-0082-08 中图分类号 TU984 文献标志码 A

DOI 10.11982/j.supr.20260111

作者简介

陈博文

浙江农林大学风景园林与建筑学院
硕士研究生

张钧韦

浙江农林大学风景园林与建筑学院
博士研究生

鲍沁星

浙江农林大学风景园林与建筑学院
副院长,教授,博士

陈丹秀(通信作者)

浙江农林大学风景园林与建筑学院
讲师,博士,735193757@qq.com

0 引言

体育建设是社会发展的重要指标。国务院印发的《全民健身计划(2021—2025年)》提出构建“10分钟体育健身圈”^[1]。然而,城市化进程加速,极端气候事件频发^[2],户外运动场所受气候影响显著,而体育场馆在环境调控与运动多样性方面更具优势。当前,我国体育场馆设施的配置面临多重挑战:人均体育场地面积仅为2.62 m²,低于周边国家水平^[3];体育场馆整体可达性不佳,距离“举步可及”的目标差距较大;场馆种类单一,质量参差不齐^[4]。此外,现有的研究中,或是仅关注场馆自身运

营^[5]、建筑设计^[6]等方面,或是仅关注体育设施^[7]、体育空间^{[8]381-382}等概念,对体育场馆空间布局配置的公平性和合理性鲜有关注。总体而言,我国体育场馆设施在配置中存在可达性不佳、总量不足、质量不均及研究不足等供需失衡问题。

空间可达性是评估体育场馆等公共设施配置公平性的重要指标。传统的可达性测度方法包括供需比法、缓冲区分析、最近距离模型、Huff模型和引力模型等,这些方法在体育场馆设施的可达性测度中存在一定的局限性。例如,供需比法忽略了搜寻半径以外的人

*基金项目:浙江农林大学科研发展基金人才启动项目“浙江省城市公园规划建设与更新研究”(编号2023LFR074)资助。

被服务情形^[9];缓冲区分析缺乏对于交通网络等空间障碍因素的评估^[10];最近距离模型仅关注距离因素,容易产生集聚误差^[11];Huff模型仅考虑距离和设施规模,忽略了需求点规模这一变量的影响^[12];引力模型的建模方式对结果的影响较大,且结果多无量纲,难以直观解释^[13];两步移动搜索法(2SFCA)综合考虑人口数量、公共服务设施服务能力与出行阻力差异等因素,其计算结果被视为经特殊加权处理后的人均公共服务设施面积^[14],可较为准确地反映公共服务设施的潜在可达性,在各类公共服务设施可达性的测度中得到广泛应用^{[15]624-625},但忽略了同一需求点搜索半径内设施的竞争效应^{[16]589-592}。为弥补这一不足,三步移动搜索法(3SFCA)应运而生,在各类需考虑竞争效应的公共服务设施可达性研究中得到广泛应用^[17-18]。体育场馆作为内部竞争显著的公共服务设施,与3SFCA呈现出高度的适配性。

迄今可达性研究对体育场馆的关注较少,且现有研究中未见使用3SFCA,仅在2SFCA的基础上进行改进,以下6方面还值得商榷:一是未充分考虑体育场馆之间的相互竞争作用,忽视选择权重;二是距离衰减函数沿用传统改进型2SFCA的高斯函数,与体育场馆的匹配性不佳;三是以住区、街道等地理中心作为人口需求点,与实际人口分布存在偏差;四是过往研究中大多以单一面积指标代表设施服务能力^{[8]381-382},难以体现实际设施差异^[19];五是出行距离 d_{ij} 过于理想化,大多以曼哈顿距离确定,缺乏对实际交通情况的考量^{[8]385};六是目前的研究缺乏针对不同规模体育场馆的出行方式的细化分类。

综上所述,本文针对传统改进2SFCA的不足,并结合体育场馆特征,通过优化距离衰减函数、栅格化人口需求点、改进场馆服务能力指标,以高德网络地图优化传统搜寻半径 d_0 的改进3SFCA,以杭州市主城区为研究区域,统一测度各级体育场馆在多出行方式下的可达性,揭示体育场馆可达性的差异,并为优化杭州市体育场馆布局提出优化策略。

1 研究区域与数据

1.1 研究区概况

杭州市位于中国东南沿海,是浙江省省会,长三角中心城市。其地理坐标为118°21'E—120°30'E, 29°11'N—30°33'N。地处亚热带季风气候区,夏季高温多雨,且近年来高温天气的频率和强度显著增加。

根据《杭州市国土空间总体规划(2021—2035年)》,杭州市主城区(包括上城区、拱墅区、西湖区、滨江区)是城市的核心区域(见图1),人口密度高,经济活力强,“热岛效应”更加显著,2024年夏季高温日数已突破60 d,在全国主要城市高温天数排名第6,同时,降雨天数高达143 d,在国内主要城市中处于较高水平。此类高温多雨天气对居民户外体育活动产生显著的负面影响,对城市体育场馆的布局 and 配置也提出新的要求,故本文以杭州市主城区作为研究区域。

1.2 数据来源与预处理

1.2.1 人口与体育场馆数据

本文中人口数据源自World Pop中所提供的栅格人口数据。体育场馆数据主要来源于高德地图公开的POI数据,结合《杭州市体育设施专项规划》《杭州市单元控制性详细规划》和浙江政务服务网的相关内容,并参考高德卫星影像确定场馆规模。底图来自国家地理信息公共服务

平台天地图(<https://www.tianditu.gov.cn/>)。数据处理流程为:爬取高德API中杭州市体育场POI数据,裁剪至主城区后,选取体育休闲服务大类中的体育场馆数据共2 442个。鉴于高德分类存在误差,进一步通过“球馆”“球场”等关键词筛选,增补体育场馆数据39个,最终获取体育场馆数据2 481个。

1.2.2 体育场馆分类

基于供需视角,本文结合《杭州市本级公共体育设施名录》与《杭州市大中型体育场馆名录》,重新界定体育场馆分类标准。大型体育场馆被定义为具有标志性、承办高规格赛事、服务城市及外地游客的场馆^[20],如黄龙体育中心、奥体中心;中型体育场馆为行政区文体中心、高校场馆等,服务区内市民与学生;小型体育场馆则指社区附近的健身房、球馆等,服务周边居民。通过关键词筛选,获取大型体育场馆数据33个,中型191个,小型2 257个(见表1)。筛选时,对大型场馆以“奥体、亚运、杭州”等为关键词;对中型场馆结合“体育中心、文体中心、大学”及行政区名搜索;对小型场馆则依据生活圈特征确定。对部分连锁场馆,结合高德卫星影像与百度查询进行分类。对综合体育场馆,则涵盖大中小场馆进行整体研究。

1.2.3 出行时间成本数据

高德网络地图API(Application Pro-

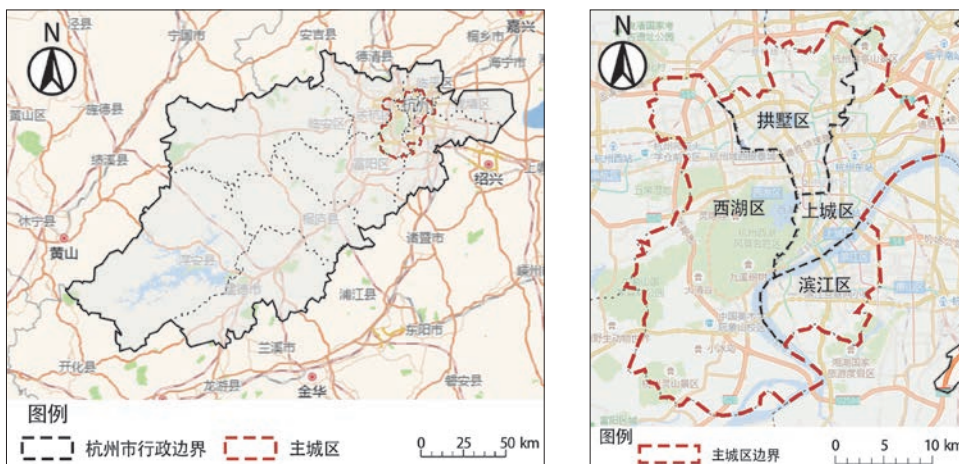


图1 杭州市行政区划及研究区域范围
Fig.1 Administrative divisions of Hangzhou and the study area boundaries

资料来源:笔者自绘。

gramming Interface) 具有高精度交通数据,综合考虑道路性质、交通方式、转弯时间、高峰拥堵、信号灯等因素,相比传统曼哈顿距离的计算方法更具优势。本文通过Python编写程序访问高德地图API接口来获取供需两点之间在车行、步行、骑行、公交地铁下的时间成本,时间选取周末,输出结果如表2所示。

2 研究方法

在3SFCA基础上,本文从优化距离衰减函数选择、人口需求点网格化、体育场馆服务能力参数(S_j)优化和多出行方式分类讨论4个方面改进模型。

2.1 改进3SFCA

2.1.1 3SFCA

3SFCA首先计算需求点与设施点之间基于出行时间的选择权重,然后按照E2SFCA的步骤计算。具体计算过程如下:

第一步:选取出行方式,根据出行时间阈值的可达区域确定人口分布点*i*的搜寻半径,并在搜寻区域内自然断点划分为4个子区。搜索区域内的所有设施点,根据所在的子区为每个设施点分配高斯权重(如设施点位于第3个子区内,则将该子区的高斯权重即W3分配给设施点),计算各设施点(供给点)与需求点*i*

之间的选择权重。

$$G_{ij} = \frac{T_{ij}}{\sum_{k \in \{d_{ik} < d_0\}} T_{ik}} \quad (1)$$

式中: G_{ij} 为需求点*i*对设施点*j*的选择权重; T_{ij} 为需求点*i*选择设施点*j*的权重, T_{ik} 为需求点*i*选择设施点*k*的权重,权重均由高斯函数分配; d_{ik} 为需求点*i*与设施点*k*之间的距离; d_0 为搜寻半径,即时间成本(即设定时间阈值内某一交通方式的出行距离)。

第二步:确定每个设施点*j*的搜寻区域,将该区域划分为与第一步相同的4个子区。对区域内的诸设施点*j*,搜寻所有在*j*搜寻半径范围内的需求点,计算设施点*j*的供需比 R_j 。

$$R_j = \frac{S_j}{\sum_{r=1}^4 \sum_{k \in D_r} G_{kj} P_k W_r} \quad (2)$$

式中: S_j 为设施点*j*的服务能力(通常为面积); W_r 为第*r*个子区*D_r*的阻抗(高斯权重); G_{kj} 为*j*与需求点*k*之间的选择权重; P_k 为需求点*k*的人口规模。

第三步:计算每个人口需求点*i*的空间可达性 A_i 。

$$A_i = \sum_{r=1}^4 \sum_{j \in D_r} G_{ij} R_j W_r \quad (3)$$

式中: A_i 表示需求点*i*的空间可达性。 A_i 值越大,需求点*i*的可达性越好。

2.1.2 距离衰减函数优化

Wang^[21]提出在2SFCA的模型中加入一项距离衰减函数 $f(d_{ij})$,形成一般化的2SFCA(generalized 2SFCA)。 $f(d_{ij})$ 进一步表示为:

$$f(d_{ij}) = \begin{cases} g(d_{ij}) & (d_{ij} < d_0) \\ 0 & (d_{ij} \geq d_0) \end{cases} \quad (4)$$

式中: d_{ij} 是需求点*i*和设施点*j*之间的距离; $g(d_{ij})$ 为距离衰减函数,本文选取与居民体育场馆出行意愿曲线高度相似的核密度函数为距离衰减函数,3SFCA的第二步供需比(R_j)测算中改进具体如下:

$$R_j = \frac{S_j}{\sum_{k \in \{d_{kj} < d_0\}} G_{kj} P_k f(d_{kj})} \quad (5)$$

同时,第三步可达性计算公式相应发生变化。

$$A_i = \sum_{j \in \{d_{ij} < d_0\}} G_{ij} R_j f(d_{ij}) \quad (6)$$

$d_{ij} < d_0$ 时, $f(d_{ij})$ 取值为核密度型距离衰减函数 $g(d_{ij})$,具体为:

$$g(d_{ij}) = \frac{3}{4} \left[1 - \left(\frac{d_{ij}}{d_0} \right)^2 \right] \quad (d_{ij} < d_0) \quad (7)$$

2.1.3 人口需求点格网化

本文通过WorldPop提供的1 km×1 km栅格人口数据,利用ArcGIS的Fishnet工具进行格网化处理,以格网中心作为人口需求点,并通过Identify工具计算每个格网单元的人口数,以更精细的空间尺度表征需求点以改善可达性计算的准确度^[22]。

2.1.4 体育场馆服务能力指标优化

本文优化3SFCA中的 S_j 参数,以体育空间为单位,利用GIS 10.6“分区统计”功能计算工作日与周六晚上的热力均值^{[23]112-114}。基于体育场馆分级,按不同半径构建缓冲区(大型150 m、中型80 m、小型30 m)估算体育空

表1 体育场馆设施分类与数量统计

Tab.1 Classification and quantitative analysis of sports facilities in sports venues

等级	服务对象	空间构成	服务范围	数量/个	占比/%
大型体育场馆	城市居民,外地游客,运动员	大型赛事场馆	城市及周边范围	33	1.30
中型体育场馆	各片区居民	体育中心,高校操场体育馆,商业化球馆	市级片区	191	7.70
小型体育场馆	周边住区居民	小型健身房,小型球场	周边生活圈	2 257	90.00

资料来源:笔者自制。

表2 出行时间成本数据示例

Tab.2 Travel time cost data illustration

id	需求点id	起点经度	起点纬度	场馆id	终点经度	终点纬度	距离/m	耗时/s
2158	1	120.159024	30.329771	51	120.161250	30.353750	4 596.760	3 309.665
2159	1	120.159024	30.329771	52	120.169583	30.353750	4 674.360	3 365.538
3201	2	120.100347	30.299553	294	120.119583	30.278750	4 129.015	2 972.890
3202	2	120.100347	30.299553	295	120.127916	30.278750	5 160.780	3 715.761
3726	3	120.130576	30.316086	19	120.127916	30.370417	7 425.764	5 346.549
3727	3	120.130576	30.316086	20	120.136250	30.370417	7 550.950	5 436.683

资料来源:笔者自制。

间矢量面^[24]。计算热力均值与面积比值表征服务水平为 S_j ,并引入权重 w_j (大型3、中型2、小型1)反映场馆差异化服务能力对居民需求的影响,最终模型如下:

$$A_i^w = \sum_{j \in \{d_j < d_0\}} G_{ij} R_j f(d_{ij}) w_j \quad (8)$$

2.1.5 场馆规模与出行方式讨论

综合体育场馆与小型体育场馆均基于“10分钟健身生活圈”概念,将 d_0 设为步行10分钟可达范围;中型体育场馆参考福州市居民运动出行意愿调研结果^[25]^[46-53],以30分钟出行时间作为阈值;大型体育场馆结合上海市居民运动出行意愿研究的结论^[26]^[31-35],以60分钟出行时间作为阈值。综合考虑场馆功能与定位,对大型与中型场馆采用高德API提供的车行、步行、公交地铁及骑行数据,进行多出行模式分类讨论。

3 杭州主城区公共体育场馆可达性分析

3.1 杭州主城区体育场馆空间分布特征

通过ArcGIS软件导入各级体育场馆的POI数据(见图2),杭州市主城区体育场馆类型以小型体育场馆为主,分布范围最广;大型场馆数量最小,分布较为零散;中型场馆与大型场馆分布整体较为接近,一部分分布于西湖区近郊区。体育场馆整体主要集中在拱墅区与上城区的核心老城区;滨江区的滨盛路、滨兴路及江南大道沿线;西湖区文一西路、文二西路沿线。

通过最近邻指数计算,大型、中型、小型体育场馆的最近邻指数分别为0.47、0.28、0.39,均小于1.00, P值均为0, Z检验值均小于临界值-2.58,表明各级体育场馆均具有显著的空间集聚特征。中型体育场馆的空间集聚最显著,大型较弱,小型居中。大型体育场馆受政策导向,注重服务范围的覆盖率和可达性,分布分散。中型体育场馆兼具公共服务与市场化运营双重属性,促其空间集聚。小型体育场馆作为社区配套设施,与居住区分布的关联性强,故空间集聚程度居中。

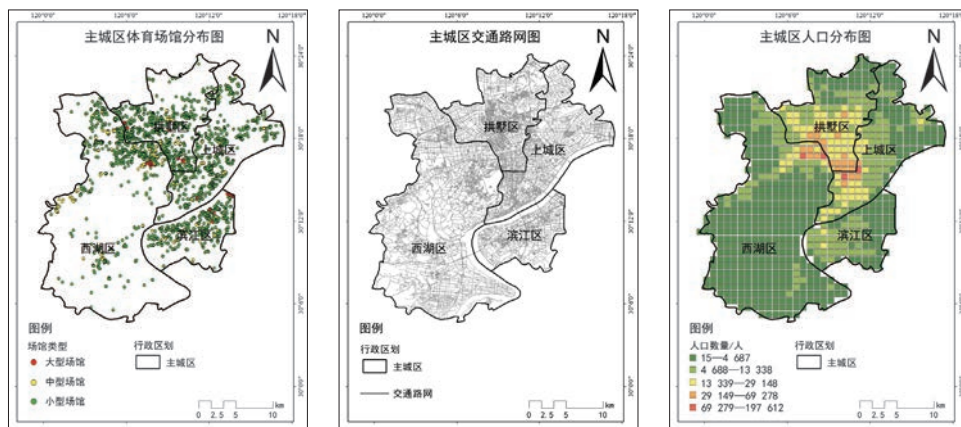


图2 主城区的体育场馆、交通路网与人口分布图

Fig.2 Distribution of stadiums, transportation network and population in the main urban area

资料来源:笔者根据国家地理信息公共服务平台天地图与WorldPop自绘。

3.2 杭州主城区体育场馆可达性分析

为进一步识别杭州市主城区各级体育场馆的可达性差异及成因,本文对800个关联人口数据的栅格进行分析,聚类指标包括可达性与栅格所关联的人口数量,并以各种出行方式所计算下的栅格平均可达性水平为界限,高于此则为高可达性区,反之为低可达性区;以栅格人口平均值6 592为阈值,高于该阈值为高密度区,反之为低密度区。根据各项指标的均值对各分区进行命名:低可达性低人口密度区(L-L)、低可达性高人口密度区(L-H)、高可达性低人口密度区(H-L)、高可达性高人口密度区(H-H)。本文将L-L、H-H的占比指标含义视为供需相对平衡,H-L栅格占比指标视为供大于求,L-H栅格占比指标视为供不应求,在此基础上进行可达性分析。

3.2.1 10分钟健身生活圈下的综合体育场馆可达性分析

剔除个别极大值干扰后,采用自然断点法重新分类的可达性如图3所示:上城区高可达性区域集中于凤起路、钱江路及临丁路沿线;拱墅区整体可达性较低,高值区仅分布于学院北路与东敦路两侧;西湖区中高值区呈零散分布,主要位于文一西路、古墩路、余杭塘路、天目山路、洙泗路、之江路及留和路周边;滨江区高值区占比显著,集中分布于滨盛路、滨兴路及江南大道沿线。

从综合场馆分布图、路网图和人口图分

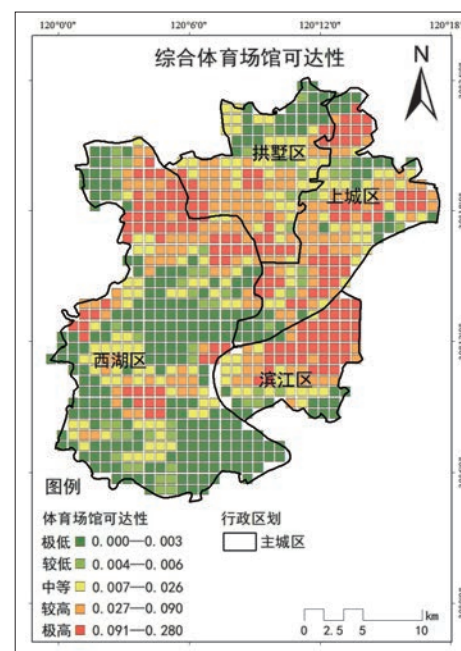


图3 综合体育场馆可达性计算结果

Fig.3 Calculation results of the accessibility of integrated sports stadiums

资料来源:笔者自绘。

析可知,高可达性地区与场馆数量密集区、路网密集区在空间分布上高度一致,推测交通便利对场馆可达性的重要性。同时,少数高可达性区域与高人口密度区重合,可见人口密度并非场馆可达性的唯一关键影响因素。

聚类结果如表3所示,分类的数量超过一半集中在L-L和L-H,低可达性地区占比达89%,L-H区域占比达25%,90%的高人口区域可达性低于平均值,主城区体育场馆在10分钟健身

生活圈建设中存在显著的地区不平衡现象。

3.2.2 大型体育场馆可达性分析

经计算,大型体育场馆在车行、公交地铁和骑行3种出行方式下,其结果如图4所示,其数据经对比后,采用综合效果最佳的自然断点法进行分类。

由图4可见,大型体育场馆在车行条件下的可达性呈现以西湖区为中心,向外环形放射状,与杭州市的交通路网结构高度相似,且越靠近郊区,可达性越低,地区间可达性值差距较小,相对较为平衡,其整体可达性水平在3种出行方式中最佳。公交地铁出行条件下,可达性高值区主要集中在上城区,其次是滨江区,显著高于其他城区,低值区主要集中在西湖区。骑行条件下,主城区可达性高值区主要集中在滨江区与上城区的滨江沿岸,整体高值区数量最少,其整体可达性水平在3种出行方式中最低。

由聚类结果表4可见, L-H区域3种出行方式占比均较低,公交与骑行方式下各区域数量和占比较为接近,低可达性区域占比均在55%左右,车行的占比相对较低,仅为27%。车行方式下的可达性明显高于其他方式,而公交和骑行的表现相对均衡。

3.2.3 中型体育场馆可达性分析

由图5可见,中型体育场馆在主城区的可达性在不同出行方式下呈现出较大的分异,其中车行与骑行出行方式下的可达性与大型体育场馆表现出显著的相似性,均受西湖区与上城区发达的交通网络影响,总体可达性较强。公交地铁出行条件下整体可达性较低,且高值区分布较为散乱。骑行条件的可达性整体呈现较低的状态,高值区主要集中在滨江区东部。

表3 10分钟健身生活圈下综合体育场馆可达性聚类结果

Tab.3 Clustering results of accessibility of integrated sports stadiums in 10-minute fitness life circles

区域类型	出行方式	栅格数量/个	占比/%
L-L	步行	515	64.38
L-H	步行	202	25.25
H-L	步行	61	7.63
H-H	步行	22	2.75

资料来源:笔者自制。

聚类结果如表5所示,车行方式整体可达性表现最佳,68%处于高可达性区,且L-H区域占比为0,公交地铁与骑行方式可达性水平

接近,同处于较低的水平,其中骑行方式整体可达性更差,低可达性区域与L-H区域占比最高,仅在滨江区钱塘江沿岸区域具备优势。

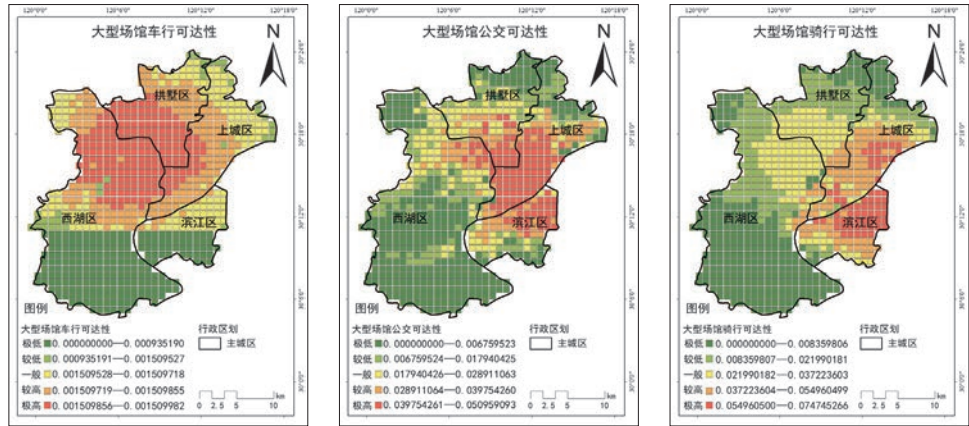


图4 多出行方式下大型体育场馆可达性计算结果
Fig.4 Calculation results of the accessibility of large sports venues under multiple travel modes

资料来源:笔者自绘。

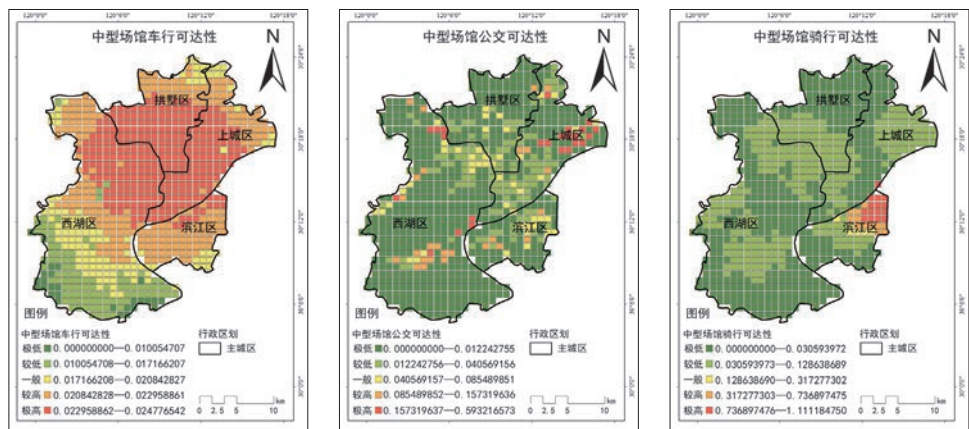


图5 多出行方式下中型体育场馆可达性计算结果
Fig.5 Calculation results of medium-sized sports venues' accessibility under multiple travel modes

资料来源:笔者自绘。

表4 多出行方式下大型体育场馆可达性聚类结果
Tab.4 Clustering results of the accessibility of large sports stadiums under multiple travel modes

区域类型	出行方式	栅格数量/个	占比/%
L-L	车行	209	26.12
	公交地铁	417	52.12
	骑行	405	50.62
L-H	车行	13	1.62
	公交地铁	27	3.38
	骑行	42	5.25
H-L	车行	367	45.88
	公交地铁	159	19.88
	骑行	171	21.38
H-H	车行	211	26.38
	公交地铁	197	24.62
	骑行	182	22.75

资料来源:笔者自制。

表5 中型体育场馆可达性聚类结果
Tab.5 Clustering results of accessibility of medium-sized sports stadiums

区域类型	出行方式	栅格数量/个	占比/%
L-L	车行	251	31.37
	公交地铁	481	60.12
	骑行	495	61.88
L-H	车行	0	0.00
	公交地铁	133	16.62
	骑行	173	21.62
H-L	车行	325	40.62
	公交地铁	95	11.88
	骑行	81	10.12
H-H	车行	224	28.00
	公交地铁	91	11.38
	骑行	51	6.38

资料来源:笔者自制。

3.2.4 小型体育场馆可达性分析

在10分钟健身生活圈步行可达性的计算结果中,因数据内不存在异常值,故对其进行自然断点法分类,结果如图7所示。高可达性区域主要集中在拱墅区余杭塘路与蒋墩路的交汇处,滨江区滨盛路与江晖路的交汇处,主城区核心区在内的大部分街道可达性都处于低值区间。

聚类结果如表6所示,主城区内小型场馆可达性水平呈现普遍较低的态势,低可达地区占比达到79%,75%的高人口区域的体育场馆可达性都处于较低水平。

4 讨论与建议

4.1 算法与结果讨论

4.1.1 改进3SFCA

体育场馆较医疗、教育等其他公共服务设施,具有使用人群更广、使用时间更分散等特点。而现有研究如王志斌^{[15]627-633}、蔚芳^{[23]117-119}等常采用高斯2SFCA模型,通过整合人口分布、设施规模与出行阻力等参数测算体育空间供需匹配度,然而其方法仍存在以下可优化维度:(1)在衰减函数选择上。陶卓霖等^{[16]594-597}建议按设施使用特性选择衰减函数,实证研究表明^{[25]46-53},相较于高斯函数,居民体育消费出行意愿曲线更贴合核密度函数分布^{[26]38-43},本文据此修订距离衰减函数以提升模型适配性。(2)关于高精度人口格网化。针对传统行政单元人口均匀分布假设的误差问题^[27],本文借鉴李孟桐等^[28]在绿地可达性研究中建立格网以精细化人口需求点的处理方法,采用World Pop所提供的1 km×1 km栅格人口数据,以反映真实人口需求点的分布。(3)在服务能力指标体系方面。本文认为传统单一面积指标无法反映体育场馆的真实服务能力,故基于王志斌等^{[15]627-633}提出的体育空间活力测度模型,引入场馆类型、人口热力等参数加权计算设施服务能力 S_j 。(4)就出行时间成本测算而言,本文改良传统OD矩阵计算曼哈顿距离的理想化算法,沿用牛强等接入高德地图API实时路况数据,获取更加精细的时间成本数据,使计算结果更加科学合理。

4.1.2 主城区场馆可达性

在10分钟健身生活圈的研究中,学界主要聚焦于体育设施、体育空间等宏观概念,尚未对体育场馆此类细分概念开展系统的可达性研究。杭州主城区体育场馆在10分钟步行可达范围内,其可达性差异主要受路网密度、场馆数量及人口分布的影响。上城区作为老城区,凤起路、钱江路周边路网密集,功能混合度高,各类体育场馆都具有一定数量。拱墅区保留大量工业遗产的影响,路网相对稀疏,仅学院北路等新建区域的可达性较好。西湖区受景区及地形的限制,路网设施分布零散,但文教区(如文一西路)因高校集聚形成局部高值区。滨江区通过窄路密网规划及产城融合,依托大型奥体场馆,在滨盛路等主干道沿线形成连续高值区。

为进一步探究场馆之间可达性的差异,对前文大型、中型、小型和综合4类体育场馆的可达性与人口聚类结果中的L-H区域与低可达区域进行汇总(大型与中型的数据由3种出行方式取平均值),如表7所示。可见:(1)大型场馆两项指标均显著低于其他场馆类型,整体可达性与供需关系表现最佳。(2)中型场馆

低可达区域占比仅高于大型场馆,表明其整体可达性尚可,但是L-H区域占比相对最高,其可达性存在显著的供需错位现象。(3)小型场馆低可达地区占比高达79%,远高于中大型场馆,整体可达性显著不足,但与人口的供需关系相对尚可。(4)杭州市综合体育场馆的整体可达性水平较差,绝大多数区域低于平均值,供需关系也较为一般。

同时,研究进一步发现,图7中由ArcGIS提供的自然断点显示综合体育场馆可达性中存在极大异常值,高达42.02,位于滨江区飞虹路与奔竞大道,即奥体中心主场馆周边,在计算中极大程度上影响了可达性均值,以致导致10分钟健身生活圈视角下出现了89%的低可达性地区。可见主城区地区间可达性差距极大,部分大型赛事场馆周边具有远高于其他地区的可达性。

表6 小型体育场馆可达性聚类结果

Tab.6 Clustering results of accessibility of small sports venues

区域类型	出行方式	栅格数量/个	占比/%
L-L	步行	461	58.00
L-H	步行	171	21.00
H-L	步行	115	14.00
H-H	步行	53	7.00

资料来源:笔者自制。

表7 各级体育场馆低可达性区域占比(%)

Tab.7 Percentage of low accessibility areas for each level of sports venues (%)

场馆类型	L-H占比	低可达性区域占比
大型场馆	10.25	46.37
中型场馆	38.24	63.00
小型场馆	21.00	79.00
综合场馆	25.00	89.63

资料来源:笔者自制。

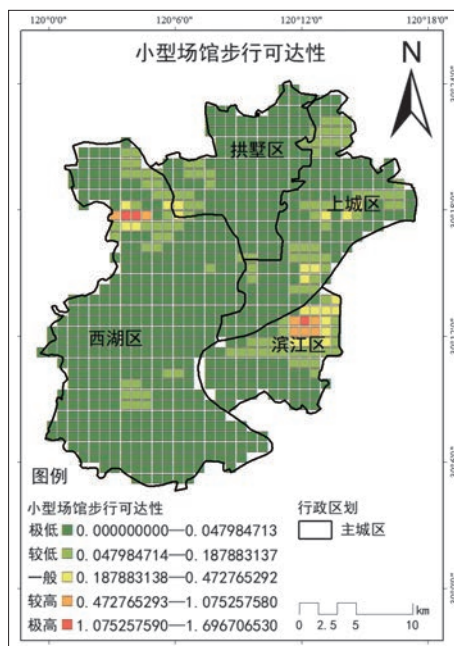


图6 小型体育场馆步行可达性计算结果

Fig.6 Calculation results of walking accessibility of small sports venues

资料来源:笔者自绘。

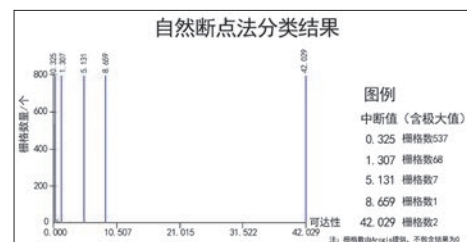


图7 体育场馆10分钟步行可达性自然断点结果

Fig.7 Natural breakpoint results for 10-minute walking accessibility to sports venues

资料来源:笔者自绘。

4.1.3 出行方式

在可达性研究中的出行方式选择上,陶卓霖等指出,多情景分析不同参数取值可为公共设施可达性计算与布局提供可靠支持。现有体育场馆可达性研究未细分出行方式,本文对体育场馆分类后根据不同出行方式对搜索半径 d_0 分类取值,使结果更具实际意义。

同时,各出行方式下的可达性与牛强等在公园绿地、郭琛琛等在教育设施的可达性研究结果具有相似特征:(1) 车行方式整体可达性最优且空间分布最均衡,主要源于大中型体育场馆多沿城市快速路与主干道呈环形放射状布局,特别是西湖区与上城区核心区域道路系统完善。(2) 公交地铁可达性呈显著空间异质性,其中上城区依托成熟公共交通网络保持最优水平,新兴城区滨江因前瞻性TOD规划表现次优,西湖区与拱墅区系统建设滞后导致可达性较弱。(3) 骑行可达性呈现单极化集聚特征,滨江区得益于滨江带线性规划与平坦地势形成绝对优势区,典型的设施供给与需求分布错位。(4) 步行方式整体可达性存在系统性短板,除拱墅西区及滨江奥体等低密度规划新区外,老城区受土地资源约束与高人口密度的影响形成大规模低值集聚区,暴露出现行城市规划中慢行交通系统的薄弱环节。

综上,不同交通方式的可达性特征既受路网密度、地理条件等建成环境因素的约束,又受区域发展阶段的影响;可达性与人口分布的交互作用呈现出显著的交通方式差异化适配特征,表现为老城区机动化出行与新城慢行系统的优势错位。

4.2 建议

基于杭州市体育场馆的可达性问题,本文提出以下对策建议。

(1) 需求侧精准识别:突破传统静态规划模式,引入LBS等新型时空数据,筛选高频健身人群信息(如通勤、职住、年龄),塑造用户画像,精准量化区域需求。针对L-H区域,优先嵌入小型场馆,并进行桥下空间改造、户外运动场地加盖等“金角银边”利用策略,实施精准补缺。

(2) 供给侧动态适配:优化场馆布局,引入最大可达性均等,MAE等选址优化模型,根据不同区域的人口分布和体育需求,构建“大型场馆辐射郊区—中型设施覆盖城区—小微设施渗透社区”的三级网络体系,重点强化小型场馆10分钟步行可达覆盖率,确保设施供给与人口分布的空间适配性。

(3) 交通衔接提升:在公共交通薄弱区域(如西湖区)加密公交站点密度,开通体育场馆接驳专线与地铁枢纽形成快速换乘系统。推进慢行交通网络建设,沿城市水系及生态廊道构建连续骑行绿道,配套智能化共享单车停放设施,建立体育出行需求与交通供给的弹性匹配机制。

5 结论与展望

5.1 结论

本文基于改进3SFCA,对杭州市主城区大型体育场馆、中型体育场馆、小型体育场馆在多种出行方式下的可达性进行研究,有效评价杭州体育场馆布局特征,为缓解体育场馆的供需矛盾,对合理配置体育场馆提出建议与策略。同时,改进3SFCA亦可用于其他公共服务设施的可达性测度,为其他公共服务设施研究提供模型参考。研究结果表明:

(1) 不同级别体育场馆的空间集聚程度与可达性显著差异,其分布特征反映了不同规模体育场馆在城市空间结构中承担的功能分异。其中,大型场馆整体可达性与供需关系表现最佳;中型场馆可达性尚可,但是存在显著的供需错位问题;小型场馆可达性最差,难以作为“10分钟健身生活圈”的基础支撑。(2) 区域可达性差异较大,主城区体育场馆可达性呈现明显供需错配突出的现象。10分钟步行可达条件下,绝大多数高人口密度区域体育场馆可达性低于平均值。其中上城区、滨江区及西湖区中的部分区域可达性较高,而拱墅区、滨江区及主城核心区的低可达性区域占比高达79%—89%。高可达性区域与交通网络(如钱江路、文一西路、江南大道等主干道)高度关联,而郊区及人口密集的老城区(如拱墅区)可达性普

遍较低。(3) 交通方式影响显著,其中车行可达性最优,可达性高值区覆盖范围广且相对均衡,但依赖西湖区为核心的放射状交通网络,郊区可达性下降。公交地铁可达性次之,上城区、滨江区因地铁线路密集表现较好,西湖区、拱墅区因站点分布不均成为低值区。骑行可达性两极分化,仅在滨江沿岸等特定区域具备优势,缺乏系统性支持。步行可达性显著不足,低可达性区域占比显著高于其他3种出行方式。

5.2 研究局限性与展望

本文仍然存在一定的不足。(1) 需求点的确定上选择World Pop所提供的栅格人口数据的网格中心,与实际人口分布仍存在一定出入,在未来可以考虑采用LBS、交通监控,手机信令等数据作为需求点,可极大提升模型的准确性。(2) 改进3SFCA未考虑体育场馆环境、运动类型以及居民年龄、性别等社会属性对可达性的影响。未来可根据反映上述因素的指标计算综合指数来优化体育场馆的承载能力,对算法做进一步的改进。(3) 本研究侧重于不同出行方式下可达性的测量与评价,未来的研究可以在此基础上,结合位置分配模型,最优供需分配模型,MAE模型等,进一步开展选址优化研究。

参考文献 References

- [1] 张利. 我国公共体育设施的发展及改革路径研究[J]. 中国体育科技, 2017, 53(2): 88-92. ZHANG Li. Research on the development and reform path of public sports facilities in China[J]. China Sports Science and Technology, 2017, 53(2): 88-92.
- [2] 单芬芬, 王凌菲, 来祺然. 基于热剖面特征的杭州城市热环境时空演化研究[J]. 地理信息世界, 2022, 29(4): 59-64. SHAN Fenfen, WANG Lingfei, LAI Qiran. Spatio-temporal evolution of urban thermal environment in Hangzhou based on thermal profile[J]. Geomatics World, 2022, 29(4): 59-64.
- [3] 国家体育总局. 2022年全国体育场地统计调查数据[R]. 2023. General Administration of Sports of China. National sports venue statistics survey data 2022[R]. 2023.
- [4] 国家发展和改革委员会, 国家体育总局. “十四五”

- 时期全民健身设施补短板工程实施方案[EB/OL]. (2021-04-27) [2021-06-05]. <https://www.sport.gov.cn/gdnps/content.jsp?id=20995819>.
- National Development and Reform Commission, General Administration of Sport of China. "14th Five-Year Plan" period national fitness facilities to make up the short board project implementation program[EB/OL]. (2021-04-27) [2021-06-05]. <https://www.sport.gov.cn/gdnps/content.jsp?id=20995819>.
- [5] 孙一民. 体育场馆的“营”与“建”[J]. 建筑学报, 2019 (5): 39-42.
SUN Yimin. Planning and constructing sports facilities[J]. Architectural Journal, 2019(5): 39-42.
- [6] 郭旗, 梅洪元. 基于数据分析模型的寒地中小型体育场馆功能优化研究[J]. 建筑学报, 2019 (S1): 135-139.
GUO Qi, MEI Hongyuan. Research on function optimization of middle and small size sport facilities in cold region based on SEM[J]. Architectural Journal, 2019(S1): 135-139.
- [7] 胡莹, 马锡海. 可达与共享: 学校体育设施开放对社区公共体育服务影响的实证研究——以苏州中心城区为例[J]. 上海城市规划, 2022 (2): 32-39.
HU Ying, MA Xihai. Accessibility and sharing: an empirical study of the impact of opening school sports facilities on public sports services in the community—a case study of Suzhou Downtown[J]. Shanghai Urban Planning Review, 2022(2): 32-39.
- [8] 张磊, 窦旺胜, 秦波. 街道尺度下北京城市公共体育设施空间配置研究[J]. 地球信息科学学报, 2024, 26 (2): 381-382.
ZHANG Lei, DOU Wangsheng, QIN Bo. Study on spatial allocation of public sports facilities in Beijing at residential communities scale[J]. Journal of Geo-information Science, 2024, 26(2): 381-382.
- [9] JOSEPH A E, BANTOCK P R. Measuring potential physical accessibility to general practitioners in rural areas: a method and case study[J]. Social Science & Medicine, 1982, 16(1): 85-90.
- [10] SUNG H, CHOI K, LEE S, et al. 多级缓冲区的土地使用和车站层次的可达性对轨道客流量的影响[J]. 城市规划学刊, 2016 (3): 121.
SUNG H, CHOI K, LEE S, et al. Exploring the impacts of land use by service coverage and station-level accessibility on rail transit ridership[J]. Urban Planning Forum, 2016(3): 121.
- [11] 曾文, 向梨丽, 张小林. 南京市社区服务设施可达性的空间格局与低收入社区空间剥夺研究[J]. 人文地理, 2017, 32 (1): 73-81.
ZENG Wen, XIANG Lili, ZHANG Xiaolin. Research in spatial planning of accessibility to community service facilities and special deprivation of low income community in Nanjing[J]. Human Geography, 2017, 32(1): 73-81.
- [12] 鄢进军, 秦华, 鄢毅. 基于Huff模型的忠县城市公园绿地可达性分析[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2012, 37 (6): 130-135.
YAN Jinjun, QIN Hua, YAN Yi. Huff model based accessibility analysis of Zhongxian Park system space[J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 2012, 37(6): 130-135.
- [13] 董小刚, 乔庆华, 翟亮, 等. 基于改进引力模型的广场公园可达性研究[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21 (10): 1518-1526.
DONG Xiaogang, QIAO Qinghua, ZHAI Liang, et al. Evaluating the accessibility of plaza park using the gravity model[J]. Journal of Geo-information Science, 2019, 21(10): 1518-1526.
- [14] 魏冶, 修春亮, 高瑞, 等. 基于高斯两步移动搜索法的沈阳市绿地可达性评价[J]. 地理科学进展, 2014, 33 (4): 482-483.
WEI Ye, XIU Chunliang, GAO Rui, et al. Evaluation of green space accessibility of Shenyang using Gaussian based 2-step floating catchment area method[J]. Progress in Geography, 2014, 33(4): 482-483.
- [15] 王志斌, 陈玉娟. 杭州市主城区体育空间可达性与活力关系研究[C]//人民城市, 规划赋能——2023中国城市规划年会论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2023: 624-625.
WANG Zhibin, CHEN Yujuan. Study on the relationship between sports space accessibility and vitality in Hangzhou's main urban area[C]//People's city, planning empowerment - proceedings of the 2023 China Annual National Planning Conference. Beijing: China Architecture & Building Press, 2023: 624-625.
- [16] 陶卓霖, 程杨. 两步移动搜寻法及其扩展形式研究进展[J]. 地理科学进展, 2016, 35 (5): 589-592.
TAO Zhuolin, CHENG Yang. Research progress of the two-step floating catchment area method and extensions[J]. Progress in Geography, 2016, 35(5): 589-592.
- [17] DELAMATER P L. Spatial accessibility in sub-optimally configured health care systems: a modified two-step floating catchment area (M2SFCA) metric[J]. Health & Place, 2013, 24: 30-43.
- [18] WAN N, ZOU B, STERNBERG T. A three-step floating catchment area method for analyzing spatial access to health services[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2012, 26(6): 1073-1089.
- [19] 张金萍, 林丹, 周向丽, 等. 基于改进3SFCA的乡村地区公共医疗设施空间可达性与公平性评价——以海口市为例[J]. 地理科学进展, 2022, 41 (4): 636-647.
ZHANG Jinping, LIN Dan, ZHOU Xiangli, et al. Spatial accessibility and equality of public medical facilities in rural areas based on the improved 3SFCA: a case of Haikou City[J]. Progress in Geography, 2022, 41(4): 636-647.
- [20] 高军波, 付景保, 叶昌东. 广州城市公共服务设施的空间特征及其成因分析[J]. 地域研究与开发, 2012, 31 (6): 70-75.
GAO Junbo, FU Jingbao, YE Changdong. Spatial characteristics and causes of urban public service facilities in Guangzhou City[J]. Areal Research and Development, 2012, 31(6): 70-75.
- [21] WANG F H. Measurement, optimization, and impact of health care accessibility: a methodological review[J]. Annals of the Association of American Geographers, 2012, 102(5): 1104-1112.
- [22] LUO W. Using a GIS-based floating catchment method to assess areas with shortage of physicians[J]. Health & Place, 2004, 10(1): 1-11.
- [23] 蔚芳, 王鑫. 基于2SFCA法的杭州体育活力空间可达性评价[J]. 城市规划, 2019, 43 (11): 112-114.
WEI Fang, WANG Xin. Measuring spatial accessibility to physical activity spaces in Hangzhou using 2SFCA method[J]. City Planning Review, 2019, 43(11): 112-114.
- [24] FAN Z, DUAN J, LU Y, et al. A geographical detector study on factors influencing urban park use in Nanjing, China[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2021, 59: 126996.
- [25] 唐圣. 基于居民体育需求下福州市台江区公共体育空间优化研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2020: 46-53.
TANG Sheng. Research on the optimization of public sports space in Taijiang District of Fuzhou City based on residents' sports demand[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2020: 46-53.
- [26] 许帅. 上海市黄浦区城市公共体育空间分布及利用情况研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2018: 31-35.
XU Shuai. Study on the distribution and utilization of urban public sports space in Huangpu District, Shanghai, China[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2018: 31-35.
- [27] 傅俐, 王勇, 曾彪, 等. 基于改进两步移动搜索法的北碚区医疗设施空间可达性分析[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21 (10): 1565-1575.
FU Li, WANG Yong, ZENG Biao, et al. Spatial accessibility of medical facilities in Beibei District based on modified two-step floating catchment area method[J]. Journal of Geo-information Science, 2019, 21(10): 1565-1575.
- [28] 李孟桐, 杨令宾, 魏冶. 高斯两步移动搜索法的模型研究: 以上海市绿地可达性为例[J]. 地理科学进展, 2016, 35 (8): 990-996.
LI Mengtong, YANG Lingbin, WEI Ye. Improved Gaussian based 2-step floating catchment area method: a case study of green space accessibility in Shanghai[J]. Progress in Geography, 2016, 35(8): 990-996.