引文格式：杨潘丰, 晏晓红, 胡春春. 城市医疗设施可达性模型关键参数分析与评价[J]. 地理空间信息, 2023, 21(5): 9-13. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2023.05.003

城市医疗设施可达性模型关键参数分析与评价

杨潘丰[1]，晏晓红[2*]，胡春春[1]
（1. 武汉大学 测绘学院，湖北 武汉 430070；2. 深圳市地质局，广东 深圳 518000）

摘　要：可达性是判定各类医疗设施布局合理性的重要指标，与医疗设施规模、区域人口密度和供需距离相关。针对目前距离衰减方法的不足和参数模型的确定问题，引入医院等级和无衰减阈值改进可达性模型，利用正则化检验模型估计距离衰减参数。以深圳市为例，分析模型中的医院等级距离衰减参数和搜索半径对二三级医疗机构可达性的影响，评估了各区域医疗设施的可达性。结果表明，深圳市二三级医疗机构距离衰减参数分别为1.4和1.0时，分级衰减与城市医疗服务诊疗情况相符，可达性空间分异显著程度与搜索半径负相关，整体格局为从“3个核心、多个中心”向外递减的圈层式结构。

关键词：可达性；距离衰减参数；改进重力模型；医疗资源；参数估计
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）05-0009-05

Analysis and Evaluation of Key Parameters of Urban Medical Facilities Accessibility Model

YANG Panfeng[1], YAN Xiaohong[2], HU Chunchun[1]
(1. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430070, China;
2. Geological Bureau of Shenzhen, Shenzhen 518000, China)

Abstract: Accessibility is an important index to determine the layout rationality of various medical facilities. Aiming at the deficiency of various distance attenuation methods and the problem of parameter model determination, we introduced the improved accessibility model with hospital grade and no attenuation threshold,which tested by regularization to estimate the distance attenuation parameters. Taking Shenzhen City for example, we analyzed the influence of distance attenuation parameters and search radius on accessibility of the secondary and tertiary medical facilities in the model, and evaluated the accessibility of medical facilities.The results show that when the distance attenuation parameters of the secondary and tertiary medicalfacilities are 1.4 and 1.0, the hierarchical attenuation is consistent with the urban medical service diagnosis, and the significance degree of accessibility spatial differentiation is negatively correlated with the search radius. The overall pattern shows a circular layer structure decreasing outward.

Key words: accessibility, distance attenuation parameter, improved gravity model, medical resource, parameter estimation

改革开放以来，我国经济发展迅速，城市化进程不断加快，更多人口流入一线城市，催生了需求集中与资源不足、分配不均的矛盾，尤其是在医疗资源空间分布与配置方面。因此，研究医疗设施的空间分布和可达性，对扩大医疗服务资源供给、优化医疗服务布局、减少人口跨区流动、化解医疗服务供需矛盾具有重要意义。1959年Hansen W G[1]提出了可达性的概念，主要应用于城市公共设施的规划选址领域。20世纪70年代，Andersen R[2]提出了医疗服务设施多维可达性模型，建立了可达性与不同要素间的联系，可反映医疗服务设施区位布局优劣。国内起步较晚，陆大道[3]院士于1995年将可达性的概念引入城市地理学领域，后续研究集中在测度方法改进[4]、空间尺度细化[5-6]、需求人群的多维度细分[7-8]、出行成本的真实估算等[9-10]方面。出行距离是影响居民就医的重要因素之一，医疗条件相同时，居民去某医疗机构就诊的概率与距离成反比。确定距离衰减参数的方法包括：借鉴已有参数值[11]；根据不同衰减阻抗的可达性结果，以城市结构、热力图为参考，确定参数经验值[12-13]；实地调查医院患者数据[14]或挖掘出租车轨迹数据[15-16]建立参数模型。已有研究通常利用同一参数评估各医院的可达性，未考虑医院等级对距离衰减的影响，与居民

收稿日期：2022-01-12；修回日期：2022-01-29。
项目来源：科技部—国家重点研发计划资助项目（2018YFC0809100）。
第一作者简介：杨潘丰（1997—），硕士研究生，研究方向为城市公共服务设施规划与配置，E-mail：1344764440@qq.com。
通信作者：晏晓红（1978—），博士研究生，高级工程师，研究方向为地理信息和自动化监测研究，E-mail：446035554@qq.com。

倾向付出更多的距离成本去获得高等级医疗服务的事实相悖。基于此，本文从不同等级医院的距离衰减参数、服务半径等方面改进重力型衰减模型，估计衰减参数，构建数学模型；并以深圳市为例，研究其二三级医疗机构的可达性，衡量区域内医疗机构的空间分布情况，为相关部门调整医疗机构空间配置提供依据。

1 研究方法

1.1 重力型两步移动搜索法

两步移动搜索法，即以供给侧和需求侧为测度，在搜索范围内进行两次移动搜索。以医院入口为供给点 j，搜索成本距离 d_0 内的覆盖面，得到供需比 R_j。

$$R_j=\frac{S_j}{\sum\limits_{k\in\{\mathrm{Dist}(k,j)\leqslant d_0\}}P_k} \tag{1}$$

$$S_j=B_j\times M_j \tag{2}$$

式中，P_k 为需求单元人口密度；$\mathrm{Dist}(k,j)$ 为需求点 k 到供给点 j 的距离；S_j 为医院 j 的供给，由卫生技术人员数量、医院床位数 B_j、医技床位比 M_j 确定。

以居民点 k 为中心，d_0 为搜索半径，将范围内供需比之和作为可达性评估指标，则有：

$$A_k=\sum_{j\in\{\mathrm{Dist}(k,j)\leqslant d_0\}}R_j=\sum_{j\in\{\mathrm{Dist}(k,j)\leqslant d_0\}}\frac{S_j}{\sum\limits_{k\in\{\mathrm{Dist}(k,j)\leqslant d_0\}}P_k} \tag{3}$$

式中，A_k 为居民点 k 的可达性指数。

根据研究区就医需求和距离衰减特征，引入重力型距离衰减函数构建两步移动搜索模型[17]，即

$$A_k=\sum_{j\in\{\mathrm{Dist}(k,j)\leqslant d_0\}}\frac{S_jf\left(d_{kj}\right)}{\sum\limits_{k\in\{\mathrm{Dist}(k,j)\leqslant d_0\}}P_kf\left(d_{kj}\right)} \tag{4}$$

$$f\left(d_{kj}\right)=\begin{cases}d_{kj}^{-\beta} & d_{kj}\leqslant d_0\\ 0 & d_{kj}>d_0\end{cases} \tag{5}$$

式中，$f\left(d_{kj}\right)$为距离衰减函数；d_{kj} 为需求点 k 和供给点 j 之间的距离；β 为距离衰减参数，值越大，距离衰减效应越强。

1.2 改进重力型两步移动搜索法

延续上述方法的基本思路，改良衰减距离和衰减参数的缺憾。通常，10 min内的出行几乎不受距离衰减效应影响，因此以 10 min 为阈值范围，将出行时间成本距离分为无衰减距离、衰减距离和不可达距离3部分。

$$f\left(d_{kj}\right)=\begin{cases}1 & d_{kj}\leqslant 10\\ \left(d_{kj}-10\right)^{-\beta\left(r_j\right)} & 10<d_{kj}\leqslant d_0\\ 0 & d_{kj}>d_0\end{cases} \tag{6}$$

居民就医倾向选择医疗服务水平高、资源丰富的医院，前往意愿受距离的影响与医院等级成反比[14]，即三级医院的距离衰减趋势因其专业水准、软硬件配置等因素相对平缓，二级医院则衰减更快。考虑医院等级水平对 β 的影响，修正所有医院衰减一致的方法，则有：

$$\beta\left(r_j\right)=\begin{cases}\beta_{\mathrm{sec}} & r_j=2\\ \beta_{\mathrm{thi}} & r_j=3\end{cases} \tag{7}$$

式中，r_j 为医院等级；β_{sec} 为二级医院的衰减参数；β_{thi} 为三级医院的衰减参数，$\beta_{\mathrm{sec}}>\beta_{\mathrm{thi}}$。

1.3 顾及医院等级的距离衰减参数估计

为检验改进模型的效能，利用各医院医师日均担负诊疗人次估计医院供需比的真实性水平。将正则化[18]作为模型选择方法，平方损失作为损失函数，正则化项是参数向量的 L_2 范数，选择经验风险与模型复杂度同时较小的模型，即

$$L(\beta)=\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\left(f\left(S_j;\beta\right)-y_j\right)^2+\frac{\lambda}{2}\|\beta\|^2 \tag{8}$$

式中，β 为参数向量；N 为医院数量；$f\left(S_j;\beta\right)$ 为医院供需比；y_j 为医院 j 医师日均担负诊疗人次；$\|\beta\|$ 为 β 的 L_2 范数；$\lambda\geqslant 0$ 为调整两项关系的系数。

在医疗可达性实际研究中，在常用参数范围[1,2]内，以0.1为间隔，取多组 β_{thi}、β_{sec}，求得不同情况下的 $L(\beta)$，如图1所示，可以看出，β_{thi} 逐渐增大时，$L(\beta_{\mathrm{thi}})$ 与 β_{thi} 成正比；$\beta_{\mathrm{thi}}=1.0$ 时，$L(\beta_{\mathrm{thi}})$ 最小；调增 β_{sec}，$L(\beta_{\mathrm{sec}})$ 呈先降后升趋势，$\beta_{\mathrm{sec}}=1.4$ 时，$L(\beta_{\mathrm{sec}})$ 为最小值，此时由二三级医院距离衰减参数确定的供需比与各医院诊疗数据最契合。改进方法规避了传统搜寻的不足，区分不同等级医院空间可达

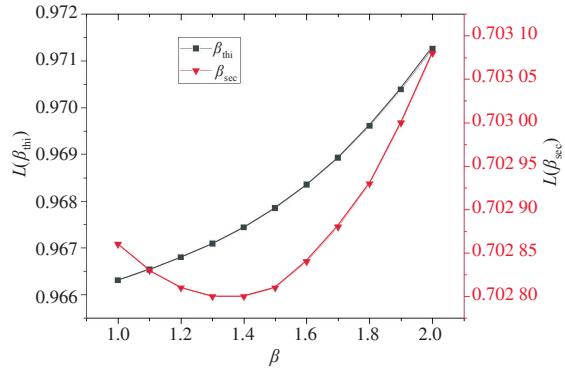


图1 不同衰减参数组合的结构风险

性的距离衰减参数，研究实际与估算供需比关系，以结构风险为评估指标，其结果能更贴切地反映研究区二三级医疗机构与各居民点间的距离衰减关系。

2　研究区概况与数据获取

1）研究区概况。本文以深圳市为例，度量区域内二三级医疗机构的空间可达性，以评价医疗服务设施分布现状。深圳市地处南海之滨，下辖9个行政区、1个新区，行政面积为1 997.47 km^2，常住人口为17 560 061人。根据深圳市卫生健康委员会数据，截至2021年上半年，全市共有三级以上医院49家，二级以上医院33家。

2）数据来源与处理。本文通过爬虫获取医疗机构信息、人口数据、城市交通实时通行数据，建立数据库，计算二三级医院可达性。①医疗机构数据，从深圳市卫生健康委员会和医院官网获取医疗机构名称、类型、级别、床位数、医生技术人员数、行政区划、地址等信息，剔除少数专科医院，汇总89条数据，鉴于部分医院缺少医生技术人员数量，根据《医疗机构基本标准（试行）》2017版中卫生技术人员床位比，补充缺失数据；②人口数据，以具备高分辨率和精确空间细节的人口统计数据WorldPop人口密度栅格为基础数据，以单位面积（1 km×1 km）中心点为居民点展开研究；③交通数据，从Open Street Map中获取路网数据，并基于每日拥堵指数变化，确定研究时段为14：00—16：00，从百度地图API中爬取实时通行信息，以2 min为间隔，分析居民点到医院的出行时间和数量分布。由图2可知，前期OD点对数量持续增长，在40 min时，数量达到峰值，随后呈明显衰减趋势，符合一线城市医疗资源分布特点，即区域内由于统一的医疗机构建设、就医圈规划，医疗服务资源随时间增长明显；跨区求医时，鉴于区域间交通、人口分布、医院分布等情况，付出的时间成本与资源增长成相反趋势。

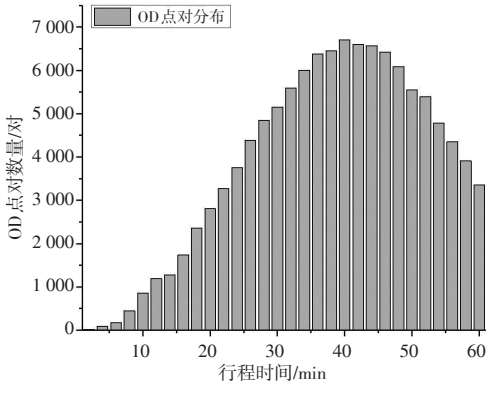


图2　OD点对行程时间分布

3　可达性测算与结果分析

3.1　衰减参数的敏感性分析

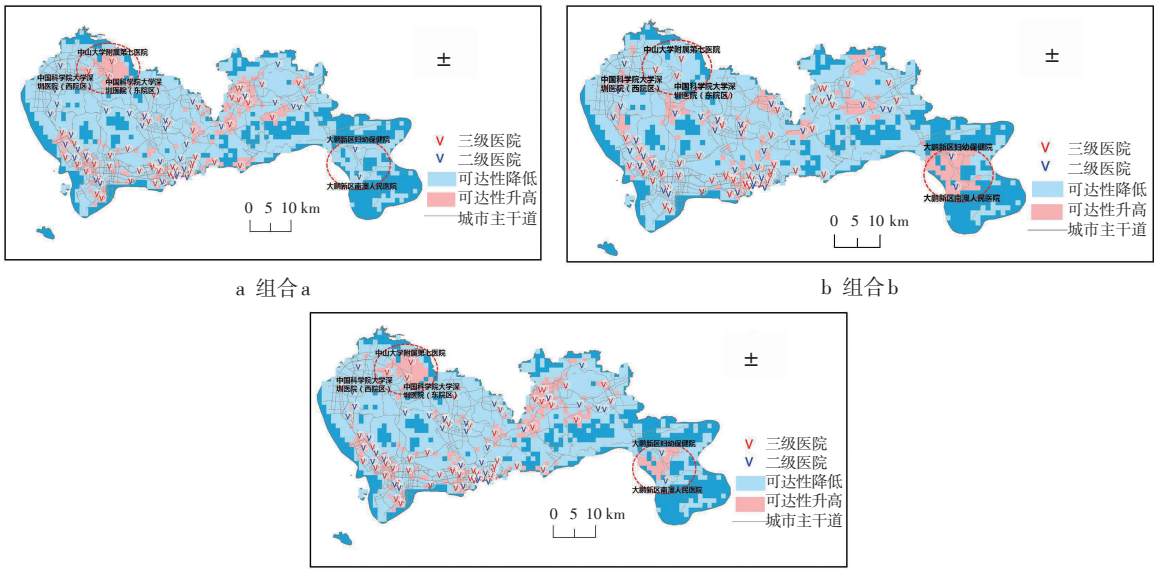
对多个衰减参数组合作敏感性分析，如表1、图3所示，可以看出，组合a以1.0为初始值，增加 β_{thi}、β_{sec} 不变，中山大学附属第七医院、中国科学院大学深圳医院东西院区附近等靠近三级医院的居民点可达性升高，而远离三级医院的地区，如仅有两家二级医院的大鹏新区，到三级医院距离远，区域可达性降低；组合b保持 β_{thi} 不变，将 β_{sec} 由1.0增至1.4，大鹏新区妇幼保健院、南澳人民医院等二级医院周围居民点的可达性得以改善，其他地区可达性变差，说明区域可达性受衰减参数的影响不同，二三等级阻抗值增大，均会导致一部分靠近相应等级医院的居民点可达性升高，其他居民点可达性降低；组合c~e以 $\beta_{thi}=1.0$、$\beta_{sec}=1.4$ 为初始值，分别以0.2、0.4、0.6为间隔，得到衰减参数，其可达性变化较类似，随着 β_{thi}、β_{sec} 的增大，可达性升高的居民点占比减小，可达性降低的居民点占比由80.65%增至82.33%，说明可达性对二三级医疗机构距离衰减参数的敏感性较高，距离衰减参数增幅越大，区域可达性整体向更低水平发展。

表1　不同阻抗下医疗服务可达性变化占比

组合	当前值	初始值	升高占比/%	降低占比/%
a	β_{thi}=1.4 β_{sec}=1.0	β_{thi}=1.0 β_{sec}=1.0	15.31	81.86
b	β_{thi}=1.0 β_{sec}=1.4	β_{thi}=1.0 β_{sec}=1.0	14.83	83.48
c	β_{thi}=1.2 β_{sec}=1.6	β_{thi}=1.0 β_{sec}=1.4	17.67	80.65
d	β_{thi}=1.4 β_{sec}=1.8	β_{thi}=1.0 β_{sec}=1.4	17.20	81.11
e	β_{thi}=1.6 β_{sec}=2.0	β_{thi}=1.0 β_{sec}=1.4	15.98	82.33

3.2　多搜索半径可达性分异特征分析

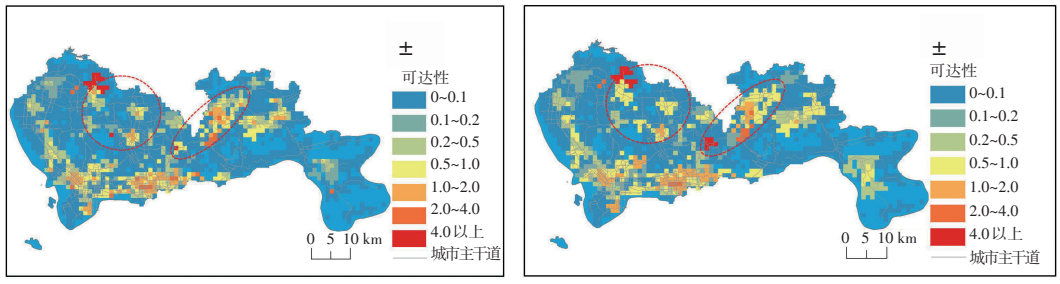
本文改进的重力型两步移动搜索法中以10 min为无衰减阈值，因此首先以10 min为搜索半径，比较有距离衰减和无距离衰减的可达性结果，并采用自然断点法，将可达性分为差（0.0~0.1）、较差（0.1~0.2）、略差（0.2~0.5）、一般（0.5~1.0）、略好（1.0~2.0）、较好（2.0~4.0）、好（>4.0）7个等级，如图4所示，可以看出，在不同衰减情况下，可达性大于0的居民点范围相同，即10 min内可到达医院的居民点一致，而



a 组合a　　b 组合b

c 组合c

图3　不同阻抗下医疗服务可达性变化



a 距离衰减　　b 无距离衰减

图4　不同衰减情况的医疗服务可达性结果

不考虑距离衰减时，整体可达性上升，尤其是关外北部区域，可达性等级由较差、略差提升至一般及以上，无距离衰减结果体现了10 min就医范围的医疗服务优势。

由于出行时间为40 min时，OD点对数量达到峰值，以40 min为搜索半径，再以波峰前后的30 min和60 min为搜索半径，分析3个搜索半径下驾车出行可获医疗服务可达性（图5），可以看出，可达性空间分异显著程度与搜索半径负相关；当搜索半径从60 min减至40 min、30 min时，空间分异加重，可达性差的

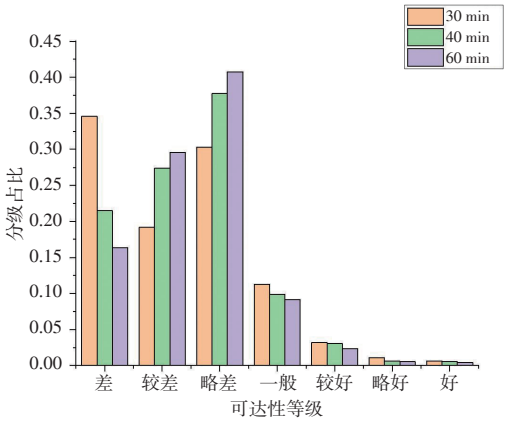


图5　多搜索半径医疗服务可达性等级分布

居民点占比由16.33%增至23.36%、34.55%，可达性大于0.5的居民点变化趋势相同。变化高值区主要在福田区、光明区、龙岗区，由内向外衰减。出行时间有限时，区域可达性较差，随着时间的延长，地域范围扩展，可选医院增多，但由于医院服务范围内覆盖更多人口，根据人口资源竞争效应，可达性高值区的位置优势被削弱，全区可达性趋向均衡。

3.3　可达性整体评价

本文采用改进的重力型两步移动搜索法，以40 min为搜索半径，评估深圳市二三级医疗设施可达性，结果如图6所示，深圳市各居民点到二三级医疗设施的可达性呈现从“3个核心、多个中心”向外递减的圈层结构，以福田区莲花街道、光明区新湖街道、龙岗区龙湖街道为核心，多所医院聚集地为中心，可达性向外逐渐减小。福田区和罗湖区位于深圳市核心位置，二三级医院数量占全市的29.21%，驾车最短12 min到达医院，区域可达性很好。南山区医院南北均衡分布、人口密度大，资源竞争使得不能很好满足就医需求，无明显的高低值区域。盐田区仅有一家三级医院，加之低山丘陵影响，在关内四区中可达性

最差。龙岗区以龙城街道为中心，前往罗湖区的区域为可达性高值区，多条高速贯穿，方便居民跨区就医；西北部医院零星分布，到关内距离远，可达性差。光明区有中山大学附属第七医院、中国科学院大学深圳医院东西院区，形成了由光明、新湖、公明街道组成的高值三角区。宝安区地域广阔，二三级医院数量多，可达性从新安、西乡街道朝西北方向降低，生态控制线以内区域未设立二三级医院，但有人口居住，居民可达性低于平均水平。坪山区、大鹏新区二三级医院分散，交通条件落后，距离限制大；而龙华区医院少、人口数量大，这3个区可达性较差。深圳市二三级医疗设施布局不均衡，可达性较差，尤其在东西部和北部关外区域居民获取优质医疗服务难度更大，需进一步合理规划配置区域医疗卫生机构的数量与规模，扩大优质医疗资源供给，加快实现“病有良医”。

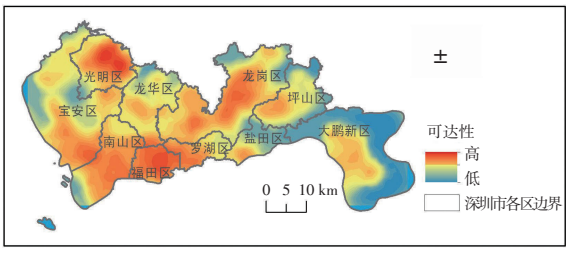


图6　深圳市医疗服务设施可达性结果

4　结　语

本文从城市医疗设施的供需角度出发，利用改进的重力型两步移动搜索法分析了二三级医疗机构的可达性；从医院等级角度探讨了距离衰减参数的差异，提出了确定与估计距离衰减参数的方法；考虑距离衰减效应的分段特质，引入无衰减部分修正重力型衰减函数。结果表明：①高等级医院比低等级医院受距离影响小，分等级衰减结果更符合医疗机构与各居民点间的距离衰减关系；②各区位受距离衰减参数影响趋势不同，增加衰减参数，远离医院地区的可达性水平降低，医院周边区域的水平提高；③可达性空间分异显著程度与搜索半径呈负相关，出行时间短，城市医疗设施可达性分异显著；④深圳市二三级医疗服务设施的可达性分布不均，呈从“3个核心、多个中心”向外递减的圈层式结构。然而，本文未考虑医院类别、出行方式、天气条件对距离衰减参数的影响，也未能与其他实验方法进行对比分析，这是后续主要的研究方向。

参考文献

[1] Hansen W G. How Accessibility Shapes Land Use[J]. Journal of the American Institute of Planners, 1959, 25(2): 73-76

[2] Andersen R. A Behavioral Model of Families' Use of Health Services[J]. Journal of Human Resources, 1968, 7(1): 125

[3] 陆大道. 区域发展及其空间结构[M]. 北京:科学出版社, 1995

[4] 陈洁, 陆锋, 程昌秀. 可达性度量方法及应用研究进展评述[J]. 地理科学进展, 2007, 26(5):100-110

[5] 陈小祥, 岳隽, 张文晖. 基于建筑物尺度的医疗设施可达性研究:以深圳市福田区综合医院为例[J]. 山东建筑大学学报, 2019, 34(1):28-33

[6] 霍青兰, 唐新明, 王鸿燕, 等. 六盘山地区医疗设施空间分布及可达性研究[J]. 测绘科学, 2021, 46(7):189-195

[7] 张琦, 李同昇, 史荣. 服务老年人群的城市高等级医院交通可达性测评:以西安市三级甲等医院为例[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2016, 44(1):96-101

[8] 申悦, 李亮. 年龄分层视角下医疗设施可达性对居民就医行为的影响:以上海市崇明岛为例[J]. 人文地理, 2021, 36(2):46-54

[9] 胡文燕. 暴雨内涝和交通拥堵情景下急救医疗服务可达性与优化配置研究:以上海市中心城区为例[D]. 上海:华东师范大学, 2019

[10] 闫凤英, 郭文秀. 基于GIS的县域医疗卫生设施可达性研究[J]. 地理空间信息, 2016, 14(10):39-42

[11] 宋正娜, 陈雯, 车前进, 等. 基于改进潜能模型的就医空间可达性度量和缺医地区判断:以江苏省如东县为例[J]. 地理科学, 2010, 30(2):213-219

[12] 王奇. 基于改进两步移动搜索法的上海市医疗服务可达性分析[D]. 武汉:武汉大学, 2019

[13] 王远飞, 张超. GIS和引力多边形方法在公共设施服务域研究中的应用:以上海浦东新区综合医院为例[J]. 经济地理, 2005, 25(6):800-803

[14] 侯磊, 温伟军, 金超, 等. 住院病人空间分布函数研究[J]. 中国卫生政策研究, 2015, 8(9):69-74

[15] 齐兰兰, 周素红, 闫小培. 广州市医疗设施可达性模型中端点吸引的影响因素检验[J]. 地理科学, 2014, 34(5):580-586

[16] YANG G, SONG C, SHU H, et al. Assessing Patient Bypass Behavior Using Taxi Trip Origin-Destination (OD) Data[J]. ISPRS International Journal of Geoinformation, 2016, 5(9):157-176

[17] WANG F H. Measurement, Optimization, and Impact of Health Care Accessibility: A Methodological Review[J]. Association of American Geographers, 2012, 102(5):1 104-1 112

[18] Strong D M, Aujol J, CHAN T F. Scale Recognition, Regularization Parameter Selection, and Meyer's G Norm in Total Variation Regularization[J]. SIAM Journal on Multiscale Modeling and Simulation, 2005, 5(1):273-303