

引用格式: 艾廷华, 雷英哲, 谢鹏, 等. 等时线模型支持下的深圳市综合医院空间可达性测度分析[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(1): 113-121. [ Ai T H, Lei Y Z, Xie P, et al. Quantifying Spatial Accessibility of Shenzhen's hospitals by the Isochrone Model[J]. Journal of Geo-information Science, 2020, 22(1): 113-121. ] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.190470

# 等时线模型支持下的深圳市综合医院空间可达性测度分析

艾廷华<sup>1</sup>, 雷英哲<sup>1</sup>, 谢鹏<sup>2</sup>, 周校东<sup>2</sup>

1. 武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430072; 2. 西安测绘研究所, 西安 710054

## Quantifying Spatial Accessibility of Shenzhen's Hospitals by the Isochrone Model

AI Tinghua<sup>1\*</sup>, LEI Yingzhe<sup>1</sup>, XIE Peng<sup>2</sup>, ZHOU Xiaodong<sup>2</sup>

1. School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China

**Abstract:** Spatial accessibility is a basic decision-making question constrained by spatial distribution situations and infrastructure conditions. The isochrone model can help address this question by applying temporal geography principles to measure by time-costs. The spatial accessibility aiming at POI facilities can be conducted from two perspectives in general: (1) on the supply side, the supplier's service accessibility is analyzed starting from specific POIs; (2) on the demand side, the customer's service convenience is analyzed starting from any location to get the nearest service. However, most studies focus on the service area of specific POIs from the perspective of supply. There is no enough attention on isochrones from the perspective of demands. To help close this gap, this study conducted the isochrone analysis of POI accessibility from the perspective of service demand, to explore the time cost starting from any place to the nearest service facility. The geometric measure applies the network Voronoi diagram model considering the distance difference from that in Euclidean Voronoi diagram. We first theoretically explained the idea of the isochrone model in terms of service demands, and then detailed the steps to apply the isochrone model. To construct the model, the POI data were firstly matched with road networks. Then a network Voronoi diagram model was developed using hospital POIs and road networks to acquire massive useful sampling points along road networks and to calculate their network distance to their nearest POIs. The isochrone model was finally constructed using the sampling points and their distance properties which reflect space-time accessibility of any place in the city in the demand of medical care to get the most convenient service. The study used the isochrone model to reveal the potential relationships between the space-time accessibility of POIs and road networks. The influence of road levels was also examined in comparison with a weighted network Voronoi diagram model. It was found that the morphology of the isochrones had close association with the distribution of POIs and the connectivity of road networks.

**Key words:** spatial decision-making; point of interest; accessibility; isochrone model; service demand; Voronoi diagram; network analysis

\*Corresponding author: AI Tinghua, E-mail: tinghuaai@whu.edu.cn

收稿日期: 2019-08-24; 修回日期: 2019-11-11.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41531180)。[ **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China, No.41531180. ]

\*通讯作者: 艾廷华(1969—), 男, 湖北武汉人, 博士, 教授, 主要从事地图综合、空间分析研究。E-mail: tinghuaai@whu.edu.cn

**摘要:**可达性是在空间分布格局、设施约束等综合条件下的空间决策问题,等时线模型为该决策分析可提供方法支持,它是以前时间地理为框架,用时间成本来衡量时空可达性的重要模型。面向兴趣点(Point of Interest, POI)可达性分析通常包括2种形式:①基于“供给”角度从特定POI出发的服务可达分析;②基于“需求”角度从任意空间位置出发获得最近服务的便利度分析。目前的研究从“供给”角度探求特定POI的服务范围居多,对“需求”角度的等时线分析关注不够。本研究针对这一缺陷,开展面向服务需求的兴趣点可达性等时线分析,考察任意位置达到某类服务设施最近点的时间代价。在几何度量方法上,本研究利用了网络空间Voronoi图模型,与传统欧氏空间Voronoi图相比,本方法顾及了街道网络对空间通达的直接影响。本研究发现了等时线的形态、坡度等特征能够反映POI的疏密分布和道路网的通达性。

**关键词:**空间决策;兴趣点;可达性分析;等时线模型;服务需求;Voronoi图;网络分析

## 1 引言

城市空间的可达性指人所持有的能够到达其目的地的能力<sup>[1]</sup>,能够反映城市空间社会经济活动的便利程度,因此研究可达性在城市交通规划、土地利用等方面具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。可达性研究的主要模型包括传统的引力模型<sup>[1]</sup>、效用模型<sup>[3]</sup>、活动模型<sup>[4]</sup>等。大多数可达性的测量方法是基于距离的,而将可达性用时间代价来衡量则是一种直观表示个体活动的可达性测量方法。时空可达性是考虑时间和空间约束情况的一种可达性研究方法。时空可达性研究的理论依据来源于Hägerstrand所建立的时间地理学<sup>[5]</sup>,该方法强调人类活动具有时空特性,自提出起便得到了广泛的应用<sup>[5-7]</sup>。时空可达性研究主要应用于城市规划<sup>[8-9]</sup>、道路交通<sup>[10-11]</sup>、土地利用<sup>[2,12]</sup>、社会发展<sup>[13-14]</sup>等领域。

基于城市设施POI的可达性分析可以分为2种情况:①基于“供给”角度从特定POI出发的服务可达分析;②基于“需求”角度从不同空间位置出发获得最近服务的便利度分析。服务的提供者(酒店、餐馆、咖啡店等的经营者)对前一个问题感兴趣,而服务的需求者(居住小区等)往往关注后一个问题。城市基础设施POI的可达性分析对前一个问题研究较多,后一个问题由于要考察任意位置达到某类服务POI集(医疗、购物、娱乐等)中最近点的时间代价,因此更复杂,涉及同类POI相互间的空间竞争、POI与需求用户间的空间共享格局。有关后一个问题的研究相对较少。

目前基于等时线的研究主要从“供给”角度,生成从特定位置出发的等时线,应用于交通网络可达性、服务设施可达性评价、辅助出型决策和交通规划的GIS系统等方面。例如,Sullivan等<sup>[15]</sup>利用等时线分析方法,研究了不同交通方式下特定点在一定时间内的可达性,指出了等时线在交通信息研究领域的作用和潜力。而对于等时线的生成方法,一

般采用Dijkstra算法<sup>[16]</sup>以特定点为起源点生成等时线。例如,何亚坤等<sup>[17]</sup>基于场论思想和水流扩展思想,提出了围绕特定设施点生成等时线的新方法,对等时线的形态进行了分析和讨论。Krismer等<sup>[18]</sup>就多模态道路网等时线的计算提出了新的算法。Baum等<sup>[19]</sup>结合图论思想提出了新的等时线定义,并基于此提出了快速计算等时线的算法。然而,这些研究均从“供给”的角度出发,关注特定服务设施点在研究区域内的影响,如在特定时间限制下基础设施服务所能覆盖到的最远范围。而在现实生活中,人们更加关注的问题往往是:从所在地出发,到达最近的目的地需要多长时间?在该问题中,“目的地”并非某特定点,只要是满足人们需求的同一类型的设施点均可成为“目的地”。因此,仅以特定点出发生成的等时线将不能满足上述问题所呈现的需求。

综合以上对可达性和等时线研究现状的分析,本文提出了面向服务需求的等时线分析方法。该方法将等时线的关注视角从“供给”侧转为“需求”侧,研究城市任意空间位置获得基础设施服务的便利程度,并提出形象的可视化表达方法。

## 2 面向服务需求的等时线

等时线作为可达性的一种度量方式,可以看作累计机会法的一种特殊情况<sup>[15]</sup>。对于位置 $x$ 而言,按照累计机会法,其时空可达性 $A_x$ 最一般的表示方法如下<sup>[20]</sup>:

$$A_x = \sum_n O_n f(D_{xn}) \quad (1)$$

式中: $O_n$ 为位置 $n$ 处的可达机会; $D_{xn}$ 为位置 $x$ 与位置 $n$ 之间的时空距离; $f$ 是调控时空距离与可达性之间关系的函数。对等时线而言,当从位置 $x$ 到位置 $n$ 的时间代价小于等于一定时间, $f$ 函数值为1,超过一定时间则 $f$ 函数值为0。传统等时线的位置 $n$ 是特定的,在一定时间限制下刚好可以到达该特定位

置的所有位置 $x$ 的连线为等时线,该连线所形成的区域为等时区域。面向服务需求的等时线表示在一定时间限制下能够到达某一类POI的位置 $x$ 的连线,此时位置 $n$ 不是特定的,而是可达机会贡献度相似的一类位置点。POI之间存在相互竞争关系,因此不能简单地对可达性进行累加。面向需求的等时线以“从所在位置能够最快到达的POI”为评判标准,对位置 $x$ 的目标POI进行了选择,可达性评价方式如下:

$$A_x = \min_n D_{xn} f(D_{xn}) \quad (2)$$

对本研究而言,此时位置 $x$ 表示深圳市综合医院的位置,位置 $n$ 表示任意出发地, $D_{xn}$ 表示从任意出发地到达综合医院的时间。相比与传统等时线,面向需求的等时线能够照顾到研究区域内的所有位置点,所反映的是某一类POI的整体可达性,而非局限于特定点。面向需求的等时线也具备等值线的共同特征<sup>[17]</sup>,在可视化表达上具有优势。例如其形状、疏密变化往往蕴含着更深层次的信息同时相较于分区统计图的可视化方法,能反映研究对象的全局变化特征,而相较于热力图,又能够更直观地量化研究对象的数值变化。

### 3 方法与实验结果

#### 3.1 思路

面向服务需求的等时线主要解决“任意位置到达最近基础设施POI所用的时间”这一问题。解决该问题的主要思路为:对数据范围内的位置点进行采样,利用采样点到最近POI的用时和插值方法,计算空间任意位置到最近POI的用时,方法流程如图1所示。其中,本研究利用网络Voronoi图技术来寻找采样点的最近POI,主要有两点理由。Voronoi图以一定的规则对目标所在的空间进行势力的划分,每个划分出的多边形区域与一个目标相关联,在

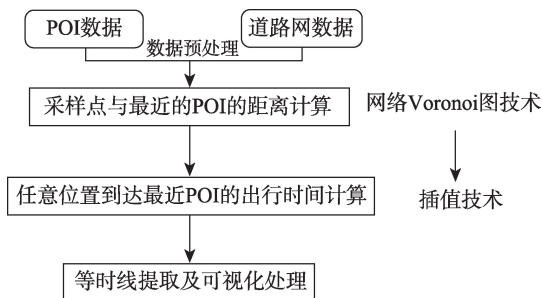


图1 面向服务需求的可达性等时线提取方法

Fig. 1 Demand-oriented extraction of accessibility isochrones

该目标点的势力范围内,任意点与目标点的距离都是在与所有目标点的距离中最近的。利用Voronoi图的思想对POI进行空间势力的划分能够快速寻找采样点所对应的最近POI。另外,POI是依附城市道路网而存在的数据类型,针对POI的空间分析如果忽略道路网的影响,将得到不准确的结论<sup>[21-22]</sup>。研究区域深圳市作为我国最大的中心城市之一,拥有大量的人口和对医疗服务的广泛需求,因此本研究以深圳市道路网数据和综合医院POI数据为研究对象,利用网络Voronoi图技术,以深圳市医疗设施的可达性为研究内容,提取面向需求的等时线来分析深圳市综合医院POI的服务需求可达性。

#### 3.2 采样点到达最近POI的用时

网络Voronoi图是传统Voronoi图在网络空间上的拓展,将距离的度量方式由直线距离扩展为沿网络的最短路径距离。Okabe等<sup>[23]</sup>对网络Voronoi图的定义如下:

$$Vor = \{Vor_1, Vor_2, \dots, Vor_n\} \quad (3)$$

$$Vor_i = \left\{ p \mid d(p, p_i) \leq d(p, p_j), i \neq j, j = 1, \dots, n \right\} \quad (4)$$

式中: $d(p, p_i)$ 为网络上的任一点 $p$ 与目标点 $p_i$ 之间的最短路径距离。

网络Voronoi图算法的主要建立方法为基于最短路径树的算法,如Okabe等<sup>[22]</sup>提出的基于扩展最短路径树(ESPT)的算法。最短路径树(SPT)技术可用于解决寻找指定点到其目的地的最短路径的问题,但该技术不能覆盖网络中所有的边,不利于网络Voronoi图的生成,因此Okabe等<sup>[22]</sup>通过增加辅助点的方式,提出ESPT算法,使该技术生成的网络Voronoi图能够覆盖网络中所有的边。另一种算法则是由艾廷华等<sup>[24]</sup>基于水流扩展思想提出的网络Voronoi图生成方法。该方法将网络进行栅格化处理,即将网络剖分为细小的线性单元,然后将对象点视作“水源”,模拟水流沿网络路径的扩展对所有线性单元进行遍历,水流的终点为与其他水流的相遇点或者路段的端点。两种算法在计算过程中均会生成一定数量的沿网络分布的过程点,如ESPT算法所生成的过程点包括方法辅助点和边界点等,而水流扩展算法在网络栅格化的过程中也会生成栅格点。这些过程点被用于辅助网络Voronoi图的计算,具有3个显著的特点:①沿网络路径分布;②覆盖所有网络路径;③具有一定密度,且密度分布较为均匀。因此这些算法的过程点满足本研究

所需采样点的基本条件,同时网络 Voronoi 图由于本身的技术特点,在计算过程中会赋予这些过程点有价值的属性,为计算采样点与其最近 POI 的距离带来了方便。综合以上特点,本研究提取网络 Voronoi 图技术的过程点作为采样点,计算与其最近 POI 的距离。实验利用 SANET 工具箱进行<sup>[25]</sup>。

对于未加权的道路网,道路各处通行速度相同,用时最短的路线即距离最短的路线。以图 2(a)所示的 POI 数据为例,以一般步行速度 5 km/h 为标准计算时间成本如图 2(b)所示。图中采样点 1—5 分别属于不同 POI 的势力范围,即与点 1 最近的 POI 为点 A,用时 3.9 min,与点 2 最近的 POI 为点 B,用时 14.4 min,与点 3 最近的 POI 为点 C,用时 9.9 min,与点 4 最近的 POI 为点 D,用时 4.1 min,与点 5 最近的 POI 为点 E,用时 12.7 min。

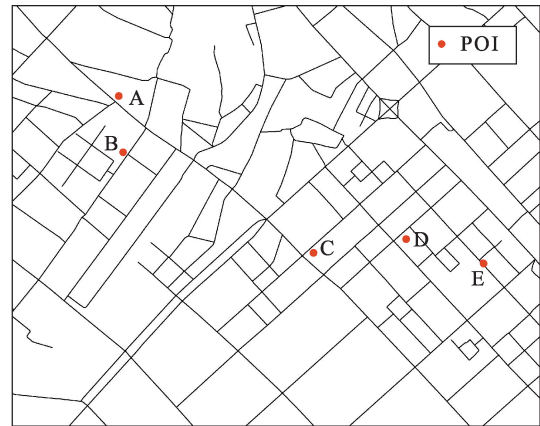
### 3.3 任意位置到达最近 POI 的用时

以图 2(a)所示 POI 数据为例,在已获取采样点到达最近 POI 的用时的基础上,通过插值分析方法,获取研究区域内任意位置到达最近 POI 的用时预测如图 2(c)所示。采用同样的方法得到深圳市综合医院 POI 的可达性分布图如图 3(a)所示,该图显示了深圳市所有位置到达最近综合医院 POI 的用时。

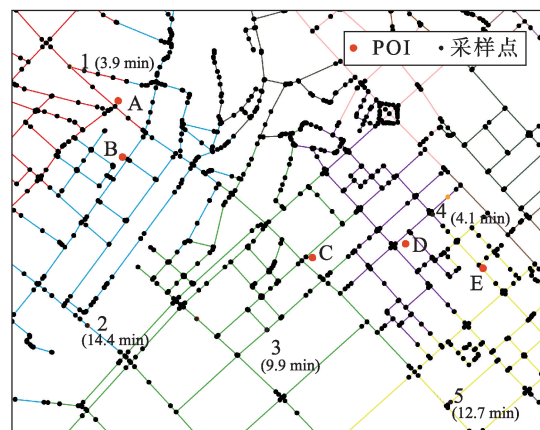
### 3.4 面向服务需求的等时线提取

面向服务需求的等时线提取基于空间任意位置到达最近 POI 用时的栅格数据,寻找所有到达最近 POI 用时相同的位置点,连在一起即为一条面向服务需求的等时线。如图 2(c)所示,图中 5 min 间隔的等时线对基础设施 POI 的服务需求在空间的分布进行了更精确的范围描述。当然位于同一条等时线或者同一等时区域的点,其最近 POI 并不一定是同一 POI。例如,点 2 和点 5 位于同一等时区域,它们到达最近 POI 的用时均大于 10 min 且不超过 15 min,但点 2 的最近 POI 为点 B,点 5 的最近 POI 为点 E。

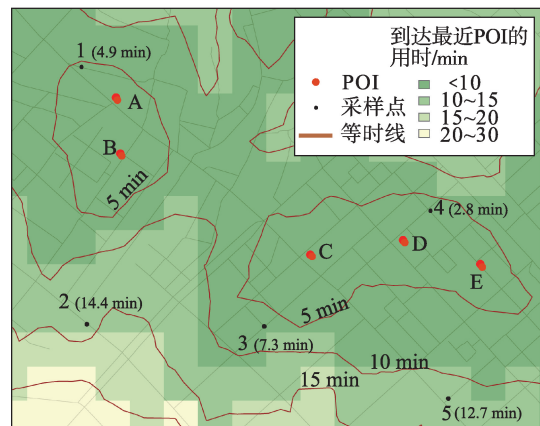
对深圳市综合医院 POI 进行等时线提取,结果如图 3(b)所示。面向服务需求的等时线能够直观地反映出深圳市综合医院 POI 可达性较高的地区和可达性较低的地区,体现了基础医疗设施在深圳市内的稀缺性分布。为了便于更具体地评估基础医疗设施服务在深圳市内的需求现状,对等时区域进行了提取和可视化。图 4 为在 10、20、30 min 内能到达深圳市最近综合医院 POI 的用时分布图。到



(a) 预处理得到的 POI 和道路网数据



(b) 采样点与其最近 POI 的距离

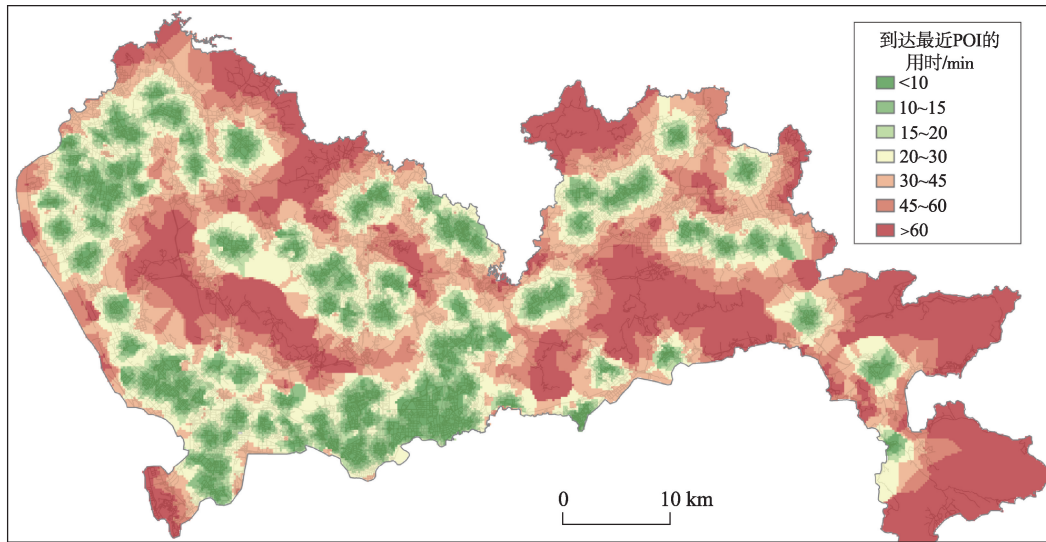


(c) 等时线提取

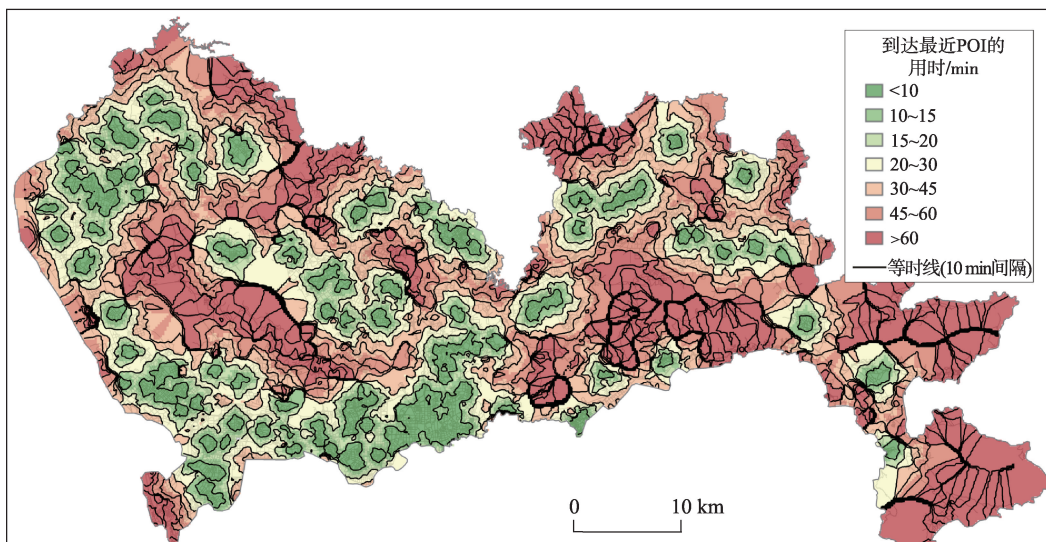
图 2 面向服务需求的等时线提取示意

Fig. 2 Illustration of demand-oriented accessibility isochrones extraction

达最近综合医院 POI 的所需用时越长反映出当地对综合医院的服务需求越大。到达综合医院 POI 的用时在 20 min 之内的区域较为接近城市街道的中心区域,而用时大于 30 min 的区域由于可达性较差,应是城市基础设施规划建设的关键关注区域。



(a) 深圳市任意位置到达最近综合医院的用时分布图



(b) 深圳市综合医院POI的等时线提取

图3 深圳市综合医院POI的等时线提取示意

Fig. 3 Accessibility isochrones of hospital POIs in Shenzhen city

表1列出了深圳市不同行政区域内能在10、20、30 min内到达最近综合医院POI的区域面积比例,从中可以看出不同行政区域基础设施建设的完善程度。

### 3.5 道路等级加权的等时线

对于考虑道路等级的加权道路网,等级越高的道路通行速度越快,采样点到达POI用时最短的路线不再一定是距离最短的路线。基于水流扩展思想的网络Voronoi图技术能够考虑道路等级来划分POI的势力范围,具体表现在:等级越高的道路水流扩展速度越快,道路栅格剖分的单位长度越大,如

图5(a)、图5(b)所示。图中实心点和空心点分别代表点1和点2势力范围下的采样点,由于考虑道路等级对水流扩展速度的影响,加权网络Voronoi图技术下部分路段采样点的最近POI会发生变化(如图5(a)、图5(b)中所圈出的地区)。图5(c)、图5(d)分别为未加权和加权道路网条件下所提取的等时线。可以发现,加权道路网条件下所提取的等时线在形态上更能体现道路的作用特点,如在高等级道路处等时线弯曲更明显,更能体现道路的延伸方向。更多对等时线形态上的讨论详见第4节。值得注意的是,POI之间的竞争关系并不会直接体现在

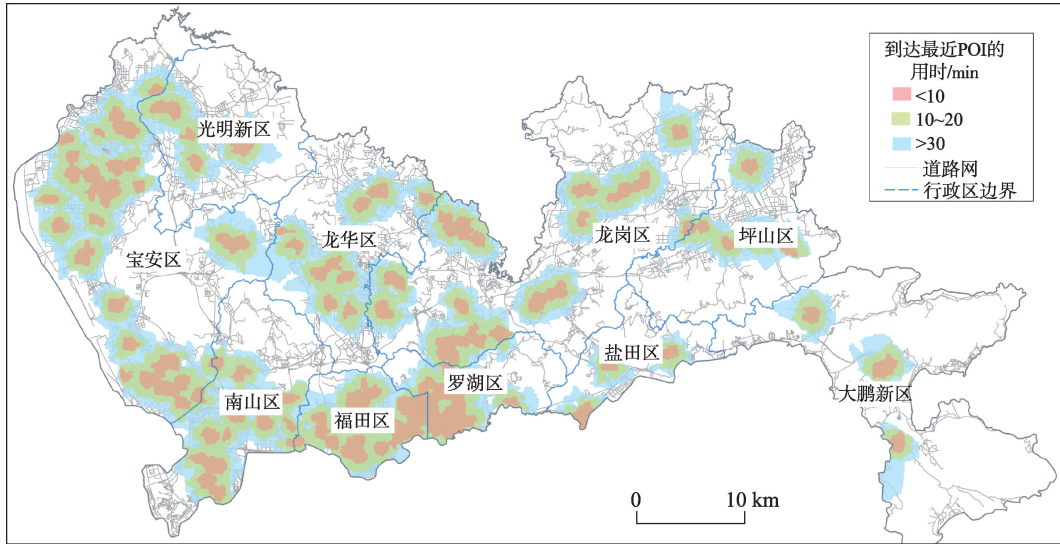


图4 深圳市各行政区综合医院POI的时间可达性

Fig.4 Time accessibility of hospital POIs in Shenzhen city

表1 深圳市各行政区综合医院可达性的面积比例

Tab. 1 Area proportions of time accessibility of hospital POIs in Shenzhen city

行政区	10 min/%	20 min/%	30 min/%
宝安区	10.60	31.55	51.86
南山区	9.50	30.92	51.03
福田区	34.25	71.33	91.32
罗湖区	21.78	40.46	58.26
盐田区	5.52	15.95	31.16
龙华区	6.14	22.60	44.20
龙岗区	7.82	23.85	41.37
坪山区	3.64	14.76	27.29
光明新区	5.40	17.76	31.95
大鹏新区	1.96	6.44	14.30

等时线结果中,尽管道路等级加权会使POI的空间势力划分发生改变,但等时线除形态细节变化之外没有明显移位,因为对于服务需求者而言,总是会选择最近的POI。

## 4 讨论

与传统等时线模型相比,面向服务需求的等时线本质上是基于场模型的思想对城市空间的形态分析<sup>[26]</sup>。在评价POI可达性时的精度主要受以下方面的影响:道路通行情况、通行速度(交通方式)、道路等级、采样点密度和插值栅格的像元尺寸。路况变化会改变从任意位置到设施点的路径规划,影响其到达设施点的时间,甚至改变最近POI的判断。

道路通行速度因为直接影响到达设施点的用时,是影响等时线分布的最重要因素,采取不同交通方式得到的等时线会有较大差别。道路等级主要通过影响不同等级道路的通行速度而间接影响等时线。采样点密度和像元尺寸则影响从采样点到任意位置可达性的插值精度。其中,在基于水流扩展思想的网络Voronoi图技术下,道路网栅格剖分单元越小,得到的采样点密度越高,而在ESPT算法下,过程点的位置不变,因而采样点密度是不变的。采样点的密度越高,像元尺寸越小,插值精度越高,生成的等时线精度也会越高。在实际运用的过程中,应当结合具体条件和分析尺度对上述因素进行控制。

参考其他等值线的形态分析方法,从疏密变化、时间坡度以及弯曲方向3个方面对面向服务需求的等时线的形态进行分析:

(1)等值线的疏密在体现表达对象的差异变化特征的同时,也能间接反映地理特征,如对等高线而言,等高线越密集,地面坡度越陡,等高线越稀疏,地面坡度越缓。在城市街道网体系中,街道网的连通模式与空间格局<sup>[27]</sup>、城市中心CBD的分布<sup>[28]</sup>都对等时线产生影响,导致不同等时线疏密变化。从图6(a)所示的局部等时线示意图中可以发现,点1和点2之间等时线的疏密分布并不均匀,尤其是在A处和B处之间。该地区在较长的距离内处于互相隔离、没有道路连通的状态,从而导致从A处到B处需要绕更远的路程。道路的不连通造成时

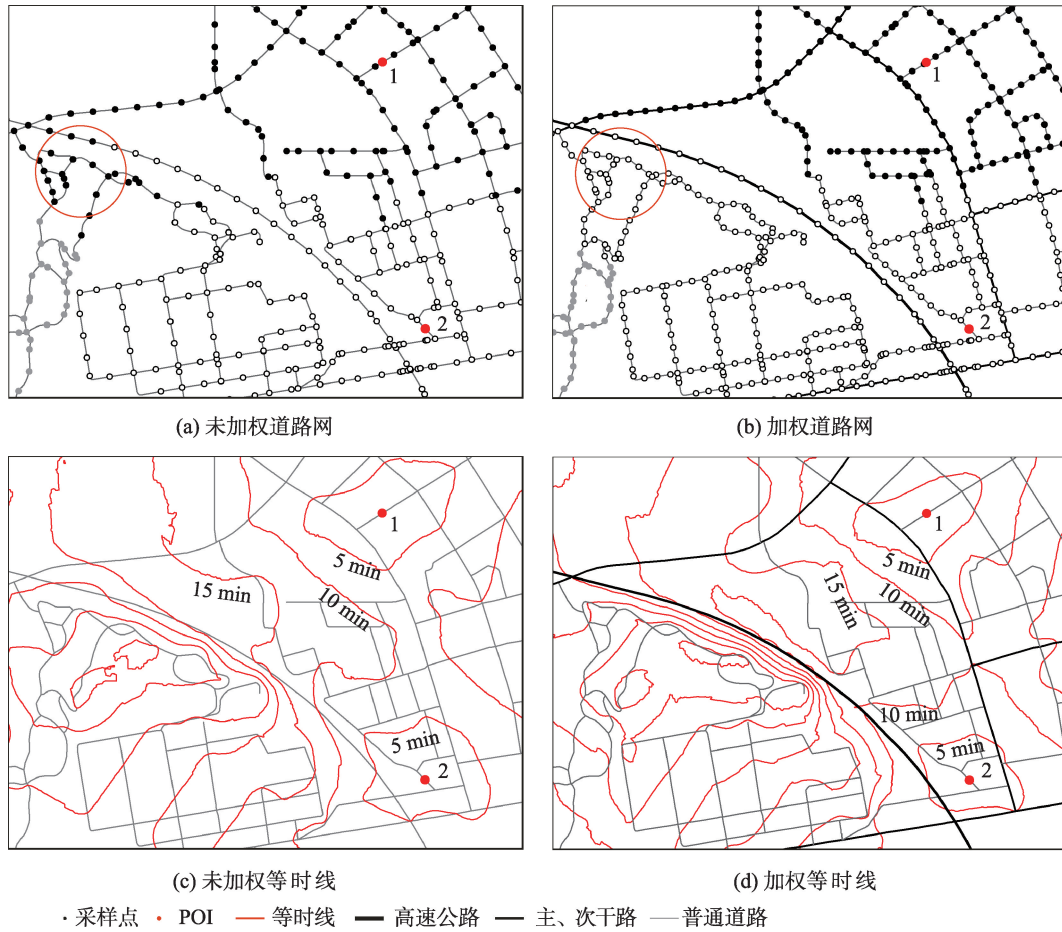


图5 道路等级加权的等时线提取示意

Fig.5 Accessibility isochrones extracted based on a weighted road network

间成本的突然增大,使A、B两处之间的等时线陡然变密。反观C处和D处,两地之间道路连通状态良好,因此等时线的间距分布相对均匀。假设增添一条道路使A、B两处可以直接连通,并重新计算和生成等时线,可以得到如图6(b)所示的结果。新增道路之后A、B两处的等时线密度明显变小。因此,等

时线越密集说明道路连通性越差。

(2)为了进一步探究道路连通性,根据深圳市综合医院POI的时间可达性计算了时间坡度图,如图7所示。时间坡度的百分比值较高的区域说明等时线越密集,反映出较差的道路连通性。选取时间坡度百分比值最高的6处区域:位置①为深圳市宝

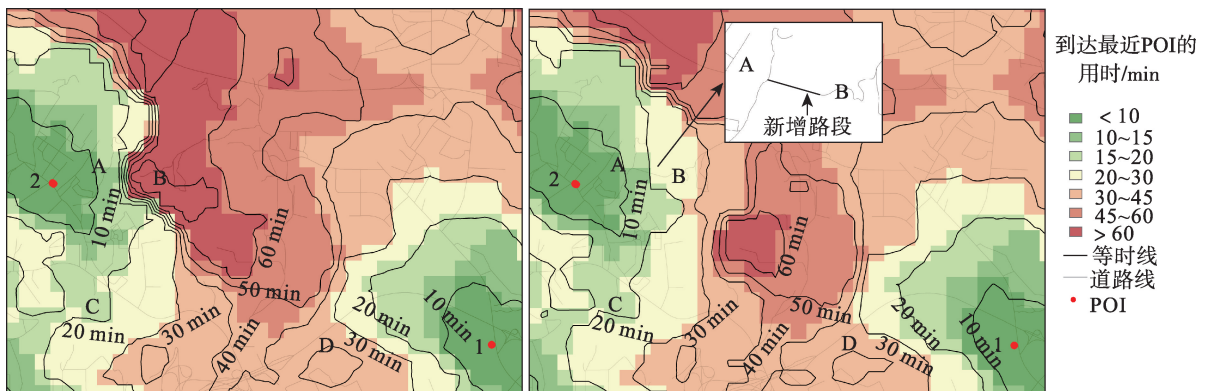


图6 道路网连通性对等时线疏密变化的影响

Fig. 6 Effects of network connectivity on the accessibility isochrones

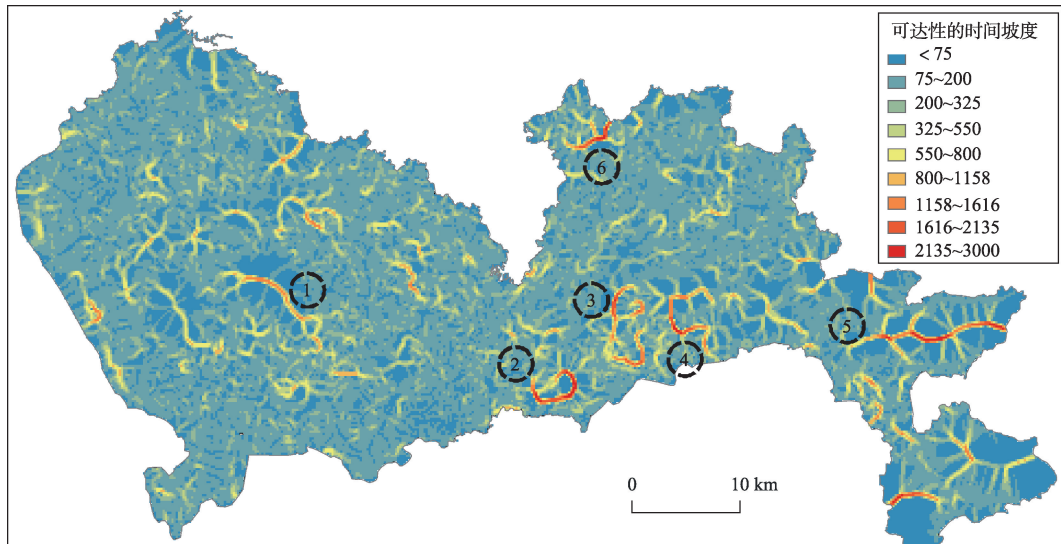


图7 深圳市综合医院可达性的时间坡度

Fig. 7 Time slope of accessibility of hospital POIs in Shenzhen city

安区羊台山森林公园;位置②为深圳市盐田区与罗湖区交界处的梧桐山;位置③和位置④为深圳市盐田区北部和东部的山区,包括梅沙尖、福田坳、莲塘峰等;位置⑤为大鹏新区中部以未木岭为主的山区;位置⑥为龙岗区最北部以红花岭为主的山区。因此造成道路网连通性较差的原因是由于山地、湖泊或者特殊城市设施用地的地形和用地特点,使城市道路无法较好地连成一片。

(3)等值线的弯曲方向能够反映表达对象的变化趋势,如根据等高线的弯曲方向能够探测山谷和山脊。对面向服务需求的等时线而言,等时线的延伸方向常与某条道路的延伸方向一致,这往往意味着在其反方向存在POI位于该道路附近,如图8所示。而对于道路网加权条件下的等时线,在高等级道路处等时线的延伸趋势则更加明显(图5(d))。

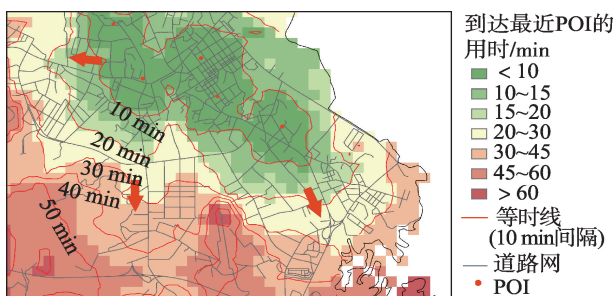


图8 等时线的延伸方向

Fig. 8 Bending direction of accessibility isochrones

## 5 结论

本研究从城市基础设施的服务需求角度出发,利用网络空间分析方法,对城市基础设施POI进行了等时线的提取,主要在以下方面有所创新:①真正做到了将同一类POI看作一个整体,体现了设施供给方和服务需求方之间的关系;②能够很好地考虑和处理同类POI之间的竞争关系;③从全局的角度分析可达性,而传统等时线模型均只在局部路网生成等时线;④从服务需求方的角度出发探讨可达性,是就等时线模型而言在可达性评价体系中的完善。实验发现:①等时线的疏密反映了城市道路网的连通性,其中等时线密集区域为道路连通性较差的区域,这些区域往往属于山地、湖泊、公园之类的特殊用地;②等时线的弯曲方向能够反映主要道路的延伸方向;③加权道路网条件下所提取的等时线在形态上更能体现道路的作用特点。对于城市基础设施的服务需求者而言,对设施的选择也可能受其他因素的影响,如设施的具体信息和需求者的主观倾向等,当考虑更多影响因素时可考虑采用基于空间相互作用的模型来可视化度量可达性。

### 参考文献(References):

- [1] Hansen W G. How accessibility shapes land use[J]. Journal of the American Institute of Planners, 1959,25(2):73-76.
- [2] Anderson P, Levinson D, Parthasarathi P. Accessibility futures[J]. Transactions in GIS, 2013,17(5):683-705.



- [3] Neuburger H. User benefit in the evaluation of transport and land use plans[J]. *Journal of Transport Economics & Policy*, 1971,5(1):52-75.
- [4] Ben-Akiva M, Bowman J L. Integration of an activity-based model system and a residential location model[J]. *Urban Studies*, 1998,35(7):1131-1153.
- [5] Hägerstrand T. What about people in regional science?[J]. *Papers of the regional science association*, 1970,24(1):7-21.
- [6] Kwan M P. Space time and integral measures of individual accessibility: A comparative analysis using a point based framework[J]. *Geographical Analysis*, 1998,30(3):191-216.
- [7] Miller H J. *Time Geography and Space-Time Prism*[M]// Richardson D, Castree N, Goodchild M F, et al. *The International Encyclopedia of Geography*, John Wiley & Sons, Ltd, 2017.
- [8] Chen B Y, Yuan H, Li Q, et al. Measuring place-based accessibility under travel time uncertainty[J]. *International Journal of Geographical Information Systems*, 2017,31(4):783-804.
- [9] Lubamba J K, Radoux J, Defourny P. Multimodal accessibility modeling from coarse transportation networks in Africa[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2013,27(5):1005-1022.
- [10] Benenson I, Ben-Elia E, Rofé Y, et al. The benefits of a high-resolution analysis of transit accessibility[J]. *International Journal of Geographical Information Systems*, 2017,31(2):213-236.
- [11] Li Q, Zhang T, Wang H, et al. Dynamic accessibility mapping using floating car data: A network-constrained density estimation approach[J]. *Journal of Transport Geography*, 2011,19(3):379-393.
- [12] Levinson D, Marion B, Owen A, et al. The city is flatter: Changing patterns of job and labor access[J]. *Cities*, 2017, 60:124-138.
- [13] Schwanen T, Wang D. Well-being, context, and everyday activities in space and time[J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 2014,104(4):833-851.
- [14] Lucas K. Transport and social exclusion: Where are we now?[J]. *Transport Policy*, 2012,20:105-113.
- [15] O'Sullivan D, Morrison A, Shearer J. Using desktop GIS for the investigation of accessibility by public transport: An isochrone approach[J]. *International Journal of Geographical Information Systems*, 2000,14(1):85-104.
- [16] Dijkstra E W. A note on two problems in connexion with graphs[J]. *Numerische Mathematik*, 1959,1(1):269-271.
- [17] 何亚坤,艾廷华,禹文豪.等时线模型支持下的路网可达性分析[J].*测绘学报*,2014,43(11):1190-1196. [ He Y, Ai T, Yu W. Accessibility analysis of road network supported by isochrone model[J]. *Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica*, 2014,43(11):1190-1196. ]
- [18] Krismer N, Silbernagl D, Specht G, et al. Computing isochrones in multimodal spatial networks using tile regions: international conference on scientific and statistical database management, Chicago, IL, USA, 2017[C]. ACM New York.
- [19] Baum M, Buchhold V, Dibbelt J, et al. Fast exact computation of isochrones in road networks: International symposium on experimental algorithms, st. Petersburg, Russia, 2016[C]. Springer-Verlag Berlin.
- [20] Koenig J G. Indicators of urban accessibility: Theory and application[J]. *Transportation*, 1980,9(2):145-172.
- [21] Yamada I, Thill J C. Comparison of planar and network K - functions in traffic accident analysis[J]. *Journal of Transport Geography*, 2004,12(2):149-158.
- [22] 禹文豪,艾廷华.核密度估计法支持下的网络空间POI点可视化与分析[J].*测绘学报*,2015,44(1):82-90. [ Yu W H, Ai T H. The visualization and analysis of POI features under network space supported by kernel density estimation [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015,44(1): 82-90. ]
- [23] Okabe A, Satoh T, Furuta T, et al. Generalized network voronoi diagrams: Concepts, computational methods, and applications[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2008,22(9):965-994.
- [24] Ai T, Yu W, He Y. Generation of constrained network Voronoi diagram using linear tessellation and expansion method[J]. *Computers Environment & Urban Systems*, 2015,51:83-96.
- [25] Okabe A, Okunuki K, Shiode S. Sanet: A toolbox for spatial analysis on a network[J]. *Geographical Analysis*, 2006,38(1):57-66.
- [26] Ai T, Zhang X, Zhou Q, et al. A vector field model to handle the displacement of multiple conflicts in building generalization[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2015,29(8):1310-1331.
- [27] He Y, Ai T, Yu W, et al. A linear tessellation model to identify spatial pattern in urban street networks[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2017,31(8):1541-1561.
- [28] Yu W, Ai T, Shao S. The analysis and delimitation of central business district using network kernel density estimation[J]. *Journal of Transport Geography*, 2015,45:32-47.