

引文格式: YU Wenhao, AI Tinghua. 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. (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.) DOI: 10.11947/j.AGCS.2015.20130538

核密度估计法支持下的网络空间 POI 点可视化与分析

禹文豪, 艾廷华

武汉大学资源与环境科学学院, 湖北 武汉 430079

The Visualization and Analysis of POI Features under Network Space Supported by Kernel Density Estimation

YU Wenhao, AI Tinghua

School of Resources and Environmental Science, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: The distribution pattern and the distribution density of urban facility POIs are of great significance in the fields of infrastructure planning and urban spatial analysis. The kernel density estimation, which has been usually utilized for expressing these spatial characteristics, is superior to other density estimation methods (such as Quadrat analysis, Voronoi-based method), for that the Kernel density estimation considers the regional impact based on the first law of geography. However, the traditional kernel density estimation is mainly based on the Euclidean space, ignoring the fact that the service function and interrelation of urban feasibilities is carried out on the network path distance, neither than conventional Euclidean distance. Hence, this research proposed a computational model of network kernel density estimation, and the extension type of model in the case of adding constraints. This work also discussed the impacts of distance attenuation threshold and height extreme to the representation of kernel density. The large-scale actual data experiment for analyzing the different POIs' distribution patterns (random type, sparse type, regional-intensive type, linear-intensive type) discusses the POI infrastructure in the city on the spatial distribution of characteristics, influence factors, and service functions.

Key words: network kernel density; POI analysis; network analysis; spatial statistics

Foundation support: The National High-tech Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2012AA12A404); The National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (No. 2012BAJ22B02-01)

摘要: 城市空间 POI 点的分布模式、分布密度在基础设施规划、城市空间分析中具有重要意义, 表达该特征的核密度法(kernel density estimation)由于顾及了地理学第一定律的区位影响, 比其他密度表达方法(如样方密度、基于 Voronoi 图密度)占优。然而, 传统的核密度计算方法往往基于二维延展的欧氏空间, 忽略了城市网络空间中设施点的服务功能及相互联系发生于网络路径距离而非欧氏距离的事实。本研究针对该缺陷, 给出了网络空间核密度计算模型, 分析了核密度方法在置入网络结构中受多种约束条件的扩展模式, 讨论了衰减阈值及高度极值对核密度特征表达的影响。通过实际多种 POI 点分布模式(随机型、稀疏型、区域密集型、线状密集型)下的核密度分析试验, 讨论了 POI 基础设施在城市区域中的分布特征、影响因素、服务功能。

关键词: 网络核密度; POI 点分析; 网络分析; 空间统计

中图分类号: P208

文献标识码: A

文章编号: 1001-1595(2015)01-0082-09

基金项目: 国家 863 计划(2012AA12A404); 国家科技支撑计划(2012BAJ22B02-01)

1 引言

美国前副总统戈尔于 1998 年 9 月提出了“数

字化舒适社区建设”即数字城市的倡议, 美国、日本等国家相继着手“数字城市”的研究与建设工作, 并取得了一定的进展^[1]。随着数据资源的丰

富和空间分析技术的发展,下一阶段“智慧城市”将转向集成处理多源空间数据以揭示空间分布规律、模式特征、过程机理,通过知识加工为城市建设管理各部门提供高层次的智能化信息服务。其中,城市基础设施数据 POI 涵盖了城市各类设施的位置信息与属性信息,在城市基础设施数据库中占有重要地位,利用城市空间分析方法研究这些数据点的地理分布特征,可以为城市规划、决策以及向社会提供社会经济、文化等统计数据服务方面发挥重要作用^[2-4]。

点模式分析是空间分析领域中最常用到的方法,可应用于多个领域,如地理、经济学、犯罪以及流行病学等^[3-9]。传统的点模式分析大多是基于欧氏距离,认为平面空间是均质的、各向同性的空间。然而现实情况是多数城市设施以及人为导致的现象是限制于二维欧氏空间内的网络部分,如 ATM、停车场以及交通事故等。空间的二维均质性假设对于一维网络空间的设施分布特征分析来说过于理想化^[10]。如果采用传统的平面空间点模式分析方法对像商场、ATM 之类的设施进行空间分布特征分析,忽略了城市空间通达、连接是沿着街道网的路径距离的事实。为此,网络空间中点的分布特征分析需要有更多考虑。

早在 20 世纪 90 年代,文献[11—13]意识到传统的平面空间分析方法在网络环境下应用的局限性,并对传统方法的网络扩展类型进行了一系列的探索,如网络环境下的空间自相关分析、时空可达性分析等。文献[14]在评估城市零售商业需求的研究中考虑到道路通行能力差异约束的重要作用,在道路网络分析中用路径时间代替路径距离。点群的分布热点、分布密度、分布趋势等特征分析是空间统计分析领域的热门问题^[3-4]。其中,K 函数被广泛应用于对空间相关性(要素聚类或扩散)进行汇总分析。文献[9]指出若将平面 K 函数直接应用于网络空间下要素的聚类分析,统计结果很可能会高估道路交叉口旁要素分布的聚集程度。针对这一问题,文献[11]给出了 K 函数在网络空间下的扩展类型,试验结果证明网络 K 函数可以较好地反映设施在网络下的聚类特征。

随着 K 函数理论在网络空间下取得的新进展,一些研究的重点开始集中到密度分析方法,这其中就包括有样方密度法及核密度法^[15-18]。要素的分布密度可以为城市规划、管理提供决策服务,从宏观上获取城市设施、事件的分布特征,如

文献[8]通过计算交通事故的网络核密度,分析事故发生的频繁路段,可以为交管部门的巡逻管理提供重要依据,减少事故的发生几率。与样方密度法对划分单元内密度的均一化估值不同,核密度的计算方法是基于地理学第一定律,即距离越近的事物关联越紧密,与核心要素越近的位置获取的密度扩张值越大^[18]。在密度分布模式上,称这种空间特征为“距离衰减效应”^[19-20]。核密度法是地理空间设施分布特征提取的重要统计分析方法,基于不同的空间距离概念可建立不同的核密度计算方法。顾及城市网络空间中设施点的服务功能及相互联系发生于网络路径距离而非传统的欧氏距离的事实,仍然采用欧氏距离进行密度计算是不合理的,这样计算的结果可能高估道路交叉口旁的密度值。考虑到这个问题,文献[16,18]提出了一种平面核密度法在网络空间下的扩展类型,并指出密度可以为城市设施的分布特征提供分析支持。但是,文献[16,18]仍然延续了平面密度的可视化方法,即利用三维密度曲面表示设施分布的聚类特点,忽略了平面空间内设施影响的各向异性特征。核密度法在空间权重计算上存在距离衰减效应,文献[15]给出了连续核密度函数与非连续的核密度函数,但是两种函数均存在一定偏差。

传统的核密度估计通过衰减带宽表征现象的空间影响域,适用于结构分析、影响范围评价等需要考虑面域影响的情况,而网络核密度方法将影响域约束至道路网络上,这更适合于通行、交通、导航以及寻径等应用。针对城市 POI 设施分布特征的分析方法,本文提出一种基于地理学第一定律的网络核密度法。该方法可顾及城市设施服务影响的地理意义,方便负载网络下不同的约束条件如路段通行方向、道路等级以及设施权重等。通过不同 POI 点(随机型、稀疏型、区域密集型、线状密集型)网络分布密度的三维可视化,核密度法可以为不同性质 POI 基础设施在城市空间分布上的空间特征、分布模式、影响因素、服务功能提供重要的决策分析工具。

2 密度分析的扩展:从欧氏空间到网络空间

密度是对空间现象的一种场表达,各位置根据其相邻设施点的空间关系决定局部的聚集强度。密度分析是基于空间平滑及空间内插技术的统计分析过程。比较原始散点图对空间现象分布

的简单表达,密度可以作为更精确的分析工具对空间特征分布作深层次的特征规律信息挖掘,特别是在完全空间随机(CSR)的假设模式下,验证聚集或规律的空间分布特征,如犯罪热点分析^[21]、城市区域描述以及经济活动空间分布分析^[17-18]。

2.1 空间点的密度计算方法

常用的点密度计算方法有样方密度法、基于V图的密度法和核密度法,如图1所示,样方密度法是将研究区域分割成一系列均匀的子区域(即样方),计算落入各样方的点数与样方面积的比值,作为样方单元的密度;而基于V图的方法是将设施点作为V图发生元,计算各V图单元面积的倒数作为对应发生元的密度值。这两类方法的实现过程较简单,但是会产生两个问题:①单元空间内的密度是均一的,忽略了内部不同位置处点聚焦强度的差别;②单元连接处的密度变化突兀,忽略了空间现象发生的连续性。核密度方法可以解决以上问题,核密度值是随中心辐射距离的增大逐渐变小,考虑了设施点对它周围位置服务影响的距离衰减作用^[21-23]。

核密度方法的计算方程可以表示为

$$f(s) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{h^2} k\left(\frac{s-c_i}{h}\right) \quad (1)$$

式中, $f(s)$ 为空间位置 s 处的核密度计算函数; h 为距离衰减阈值; n 为与位置 s 的距离小于或等于 h 的要素点数; k 函数则表示空间权重函数。这一方程的几何意义为密度值在每个核心要素 c_i 处最大,并且在远离 c_i 过程中不断降低,直至与核心 c_i 的距离达到阈值 h 时核密度值降为0。核密度函数中存在两个关键参量,即空间权重函数 k 与距离衰减阈值 h 。大量的研究表明空间权重函数的选择对点模式分布结果的影响不大,需要注意的是距离衰减阈值的选择^[16-18]。在实际中,阈值 h 的设置主要与分析尺度以及地理现象特点有关。较小的距离衰减值可以使密度分布结果中出现较多的高值或低值区域,适合于揭示密度分布的局部特征,而较大的距离衰减值可以在全局尺度下使热点区域体现得更加明显。另外,距离衰减值应与设施点的离散程度呈正相关,对于稀疏型的点设施分布应采用较大的距离衰减值,而对于密集型的点设施则应考虑较小一些的距离衰减值。衰减阈值范围内的局部空间属于地理现象空间影响域,在欧氏空间,“影响域”就是二维平面,在网络空间“影响域”是扩散的路径集。

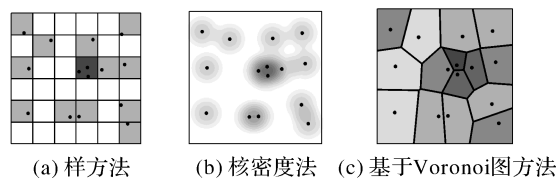


图1 平面空间下3种常用密度方法的比较示例

Fig.1 Illustration of three common method for density estimation in planar space

样方法中,由于在样方尺寸、样方方向、样方原点的选择上都具有不同程度的主观臆断性,容易造成原始数据信息的丢失;基于V图的方法会由于单元的划分而忽略Voronoi单元内密度的变化以及造成相邻单元间的密度过于突兀。核密度以一种光滑曲面的形式渐进式传输中心强度,顾及和体现了空间位置的差异性以及中心强度随距离衰减的特性,符合地理学第一定律。因此在实际应用中,样方法多用于计算具有固定边界的行政单元密度,如街区内的人口密度,全国范围内各省市的森林覆盖率等,基于V图的密度法适合于地理实体的势力范围评估,如河流汇水区域划分等,而核密度法更适合于对诸如城市设施服务影响、交通路段风险评估等连续性地理现象的密度估计^[21-22]。

2.2 网络空间下点的核密度法

核密度法顾及了地理学第一定律的区位影响,密度分析结果表现出距离越近的事物相关性越大的特征。然而基于欧氏直线距离的传统方法忽视了中心影响所依赖的传导方式,难以客观反映实际的空间特征分布,特别是以道路为社会经济活动主要途径的城市空间分析。引入路径距离则可以使核密度分析更准确地表达设施沿城市街道网络分布的细部特征。这种网络约束下的核密度方法即网络核密度法(network kernel density estimation)。

图2为平面核密度法与网络核密度法的计算差别示意图。从图中可见平面核密度法是基于欧氏直线距离度量来计算位置的密度值,而网络核密度函数中距离被定义为最短路径距离,即式(1)中 h 表示网络衰减路径距离, $(s-c_i)$ 指位置 s 与 c_i 之间的最短路径距离。在选取同样的距离衰减阈值的情况下,平面核密度法有可能会高估空间现象的聚集程度。如图2中三角形符号表示的设施在平面空间下对3个正方形所处位置产生密度计算,而基于网络路径距离时,所有正方形位置均

没有密度影响。实际上,相同分布密度的 POI 在不同的网络位置上也可能会得到不同的密度估计,如道路沿线一侧分布的 POI 与分列于十字路口四侧的相同分布的 POI。这是由于设施密度估计依赖于局部网络的空间排列,而现实中道路在不同区域内的排列往往呈不规则形态,使得 POI 在平面内的相同分布在引入了网络约束之后存在空间不一致性。因此可以认为网络位置的密度估计不仅与 POI 的密集程度相关,也很大程度上依赖于局部网络的可达性情况。

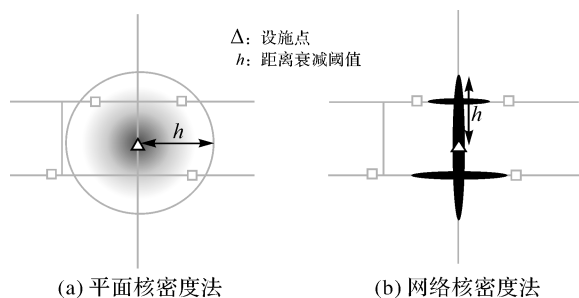


图 2 平面核密度法与网络核密度法

Fig.2 Planar kernel density estimation and network kernel density estimation

2.2.1 常规条件下的网络核密度计算

为了体现要素服务强度在空间分布上存在的“距离衰减效应”,一些研究给出了核密度的空间权重计算函数,如高斯方程、四次方程、负指数方程、最小方差方程等。虽然不同的权重函数对远近位置的空间加权计算有所差别,但是都基于同一过程,即权重值从中心向周围位置按距离衰减。大量相关的研究和实践也表明权重方程的选择对点模式分布结果的影响不大,变量中可以产生影响的主要是距离衰减阈值的确定(即式(1)中的参数 h)^[3-4,16-19]。因此,本研究采用式(2)所示的四次权重方程,另外根据应用尺度及试验需求来具体讨论衰减阈值的大小

$$k\left(\frac{s-c_i}{h}\right)=\frac{3}{4}\left(1-\frac{(s-c_i)^2}{h^2}\right) \quad (2)$$

基于四次权重函数,网络弧段上任意位置的密度值都可以计算获得,网络密度的分布情况可以用一种光滑的三维曲面墙来表示,如图 3 所示。图中,中心点处密度值最高,沿着网络的可传导路径,密度逐渐衰减,至与核心 C 的网络距离达到阈值 h 时核密度值降为 0。

考虑到密度空间分布的连续性以及受平面核

密度的三维曲面可视化方法的启示,本研究提出了一种网络核密度计算方法,方便密度的三维可视化。

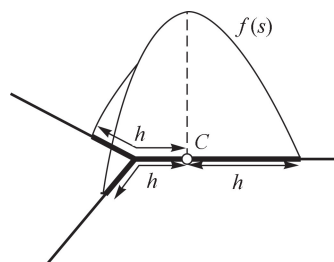


图 3 网络核密度计算模型

Fig.3 The model of network kernel density estimation

(1) 首先将所有道路交叉点和不同等级道路的分界点等特征点定义为网络节点,利用网络节点自动分割道路,生成网络弧段,然后将弧段等分为一定长度的基础线性单元集。这里称基础线性单元为网络栅格,建立网络节点—弧段拓扑关系以及网络栅格—栅格拓扑关系、网络节点—栅格拓扑关系,构建完整的栅格数据结构。

(2) 将网络上离设施点欧氏距离最近的栅格单元定义为发生元,初始化发生元,定义网络核密度计算的距离阈值 h 。

(3) 搜索与发生元中心点的最短路径距离小于 h 的邻域栅格,并计算发生元与所有邻域栅格中心点的最短路径距离,基于选择的核密度方程,计算发生元在各邻域栅格处的密度辐射值。

(4) 重复执行步骤(3),直至所有发生元的邻域栅格的密度值计算完毕。

(5) 计算栅格的所有邻域发生元在该位置的密度值之和,并将其作为该栅格的核密度值,若栅格邻域范围内不存在任何发生元,则该栅格的核密度值默认为 0。

如图 4 中弧段上的线性单元是以计算的密度属性值为 z 值,并竖立成三维墙。读者可以观察墙的空间延展特征来直观地获取设施的聚类分布情况。高墙竖立的局部空间往往是设施聚集的中心区域,而谷地出现较多的区域一般为某设施服务影响较小的区域。通过不同类型设施的密度图,可以分析城市发展的全局规划及局部区域中设施分布的地理特点。

网络核密度空间分布的光滑程度由距离衰减阈值 h 决定。 h 值越大,密度分布就越光滑。 h 阈值的确定取决于以下 3 个因素:①核密度的应

用尺度,较大的距离衰减阈值适合表示全局视角下设施分布的一般聚类特征,若采用较小的衰减阈值,密度分布的局部差异更突出,适合表示设施分布的局部特征;②设施点之间的距离,衰减阈值的大小应与设施数据的离散程度呈正相关关系,若采用较小的衰减阈值来分析呈稀疏型分布的设施数据,核密度图可以提供的信息量与原始散点图将没有差别;③设施 POI 的性质,不同性质设施在空间所表现的特征尺度不一样,如大型商场的服务范围比小型便利店的服务范围更大,可以使用较大的影响范围,获取客观的服务空间分布特征。事实上,以上规则的几何意义可以表示为:与中心距离小于阈值 h 的路径集合属于该中心的“影响域”,阈值越大意味着中心 POI 可影响的范围越广,邻近位置的核密度变化也越平滑,适合于研究大尺度下地理现象间的交互作用,而小的阈值将使得辐射密度主要集中在中心附近的小区域范围内,从中心到影响域边界的密度衰减过程较快,适合于表达小尺度下个体对象的局部影响力。

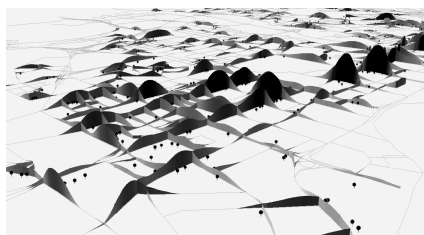


图4 网络核密度的三维可视化
Fig.4 Three-dimensional visualization of the spatial pattern of density estimated by the network kernel density estimation

2.2.2 地理约束条件下的核密度计算

任何一个区域的设施分布密度是由该位置受相邻设施点的服务影响决定的,需要考虑地理空间约束条件下的服务可达性。本研究考虑在网络边通达方向、通行能力以及发生元权重的实际条件下,可通过负载空间权重的约束条件计算约束网络核密度。

2.2.2.1 网络边通达方向约束

针对不同服务类型的设施,本文扩展了两类核密度计算方法:第一类是扩展型核密度,该类型适合于向外提供服务的设施,如披萨的外送店;第二类是内敛型核密度,该类型适合于吸引顾客的设施,如停车场。图5为扩展型核密度与内敛型核密度在边通达方向约束下的几何模型,若路段

通达方向与设施服务方向相反,该路段任意位置处的密度值则为0。空间权重函数(2)在方向约束下的扩展方程应为

$$k'\left(\frac{s-c_i}{h}, x\right) = \frac{3}{4}g(x)\left(1 - \frac{(s-c_i)^2}{h^2}\right) \quad (3)$$

式中, $g(x)$ 为二值函数(设施服务方向与弧段的通达方向一致时,函数值为1,否则为0)。

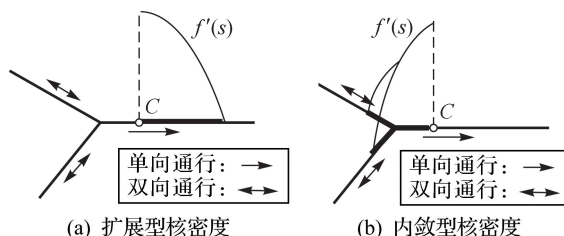


图5 道路通达方向约束下的核密度

Fig.5 Kernel density estimation under constraint of road's direction

2.2.2.2 网络边通行能力差异约束

考虑到各等级道路通行能力的差异性,密度衰减阈值 h 与空间权重的计算可用路径时间替代路径距离。式(4)、图6分别为网络边通行能力差异约束下的空间权重计算函数及核密度的几何模型。如图6所示,除核心点 C 外,高等级道路上设施对邻近各位置的加权核密度值(黑色曲线 $f'(s)$)的影响要比常规核密度值(灰色曲线 $f(s)$)大,影响范围也更广

$$k'\left(\frac{s-c_i}{h_t}\right) = \frac{3}{4}\left(1 - \frac{(s-c_i)_t^2}{h_t^2}\right) \quad (4)$$

式中, h_t 为基于路径时间的密度衰减阈值; $(s-c_i)_t$ 为位置 s 与 c_i 之间的最短路径时间。

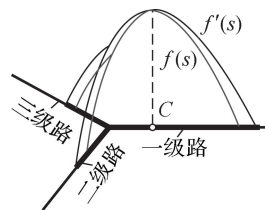


图6 道路通行能力约束下的核密度

Fig.6 Kernel density estimation under constraint of road's weight

2.2.2.3 设施权重差异约束

城市设施因为规模、商品价格等属性因素的差异,使其对周围位置的服务影响能力也有区别。式(5)、图7分别为考虑设施权重条件下的空间权重函数及核密度的几何模型。图7中,因为设施

C' 的权重大于 1, 因此根据式(5)计算的加权核密度值(黑色曲线 $f'(s)$)要大于同位置上的常规核密度值(灰色曲线 $f(s)$), 并且密度衰减阈值 h' 也要大于常规阈值 h

$$k' \left(\frac{s-c_i}{h'}, y \right) = \frac{3}{4} n(y) \left(1 - \frac{(s-c_i)^2}{h'^2} \right) \quad (5)$$

$$h' = h p(y)$$

式中, $n(y)$ 为密度值的设施权重函数; $p(y)$ 为距离衰减阈值的权重函数。

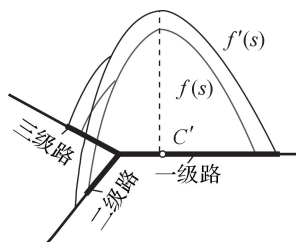


图 7 设施权重约束下的核密度 ($n(y) > 1$)

Fig.7 Kernel density estimation under constraint of facility's weight ($n(y) > 1$)

综合以上 3 种约束条件, 加权网络核密度的扩展方程可以表示为

$$k' \left(\frac{s-c_i}{h'_i}, x, y \right) = \frac{3}{4} g(x) n(y) \left(1 - \frac{(s-c_i)^2}{h'^2_i} \right) \quad (6)$$

$$h'_i = h_i p(y)$$

应用尺度、点集离散程度以及设施服务性质等因素是通过确定全局的衰减阈值, 从分析的应用背景、数据的空间分布特征和服务的地理意义 3 个方面对密度分析产生影响。在具体的城市环境中, 由于服务对诸如道路方向、通行能力等交通可达性的需求, 中心点对周围路径上的辐射强度也不是一致的, 所以即使确定的衰减阈值相同, 约束下的核密度估计在高等级道路或双向通行道路上的服务强度也会强于其他可达性差的区域。本研究通过确定全局的衰减阈值, 用路径时间替代路径距离并在图结构中考虑弧段方向等可达性因素, 可以模拟设施服务在真实道路网络中的分布特征。

3 试验与讨论

基于以上方法, 本研究采用 VC++ 编程语言开发了网络核密度计算的试验系统, 对深圳市街道网中具有 4 类不同分布特征(随机型、稀疏型、区域密集型以及线状密集型)的设施点进行密度计算。参与分析的道路网络由 37 977 条道路链

段组成, 不同分布特征的设施类分别为垃圾污水处理站、图书馆、银行以及加油站, 它们的数量为 476、215、1575、300。图 8、图 9 为各类设施的散点图以及网络栅格剖分尺度为 40 m 时的核密度三维立体图。

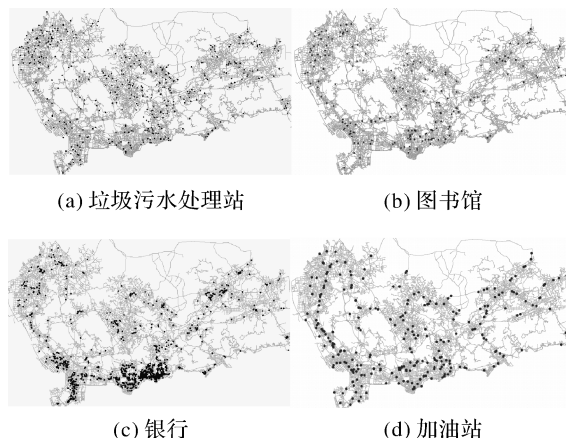


图 8 设施分布散点图

Fig.8 Dot maps of the facilities

本研究是从一个宏观的视角分析点设施在道路网下的分布特征, 因此核密度试验均采用了较大的衰减阈值, 如图 9(a)、(b)、(c)、(d) 中阈值分别为 3000 m、4000 m、3000 m、3000 m。图 8(a)、(c)、(d) 中设施的密集程度要高于图 8(b) 中的图书馆类设施, 而且图书馆的服务范围较广, 以较大的空间影响区域分析设施的分布特征更符合客观情况, 因此在图 9(b) 中密度衰减阈值要大于其余 3 类设施点。试验将核密度值作为网络剖分栅格的 Z 值, 实现了将网络弧段竖立成高低不平的立体“墙”的可视化表达效果, 如图 9 所示。

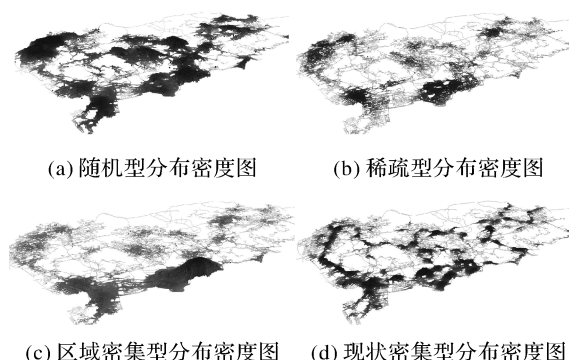


图 9 网络核密度的三维可视化

Fig.9 Three-dimensional visualization of the spatial pattern of density estimated by the network kernel density estimation

从试验中可以看出,基于网络核密度的方法可以描述不同性质设施点在城市空间分布上的空间特征、分布模式、影响因素、服务功能等。如图9(a)所示的呈随机分布的垃圾污水处理站的密度图,城市网络空间中主要几个区域(即西北、西南、南、北以及东北方)的密度墙高度近似相同,不存在突兀的高墙或低谷等非随机分布特征。这类密度分布结果说明垃圾污水处理站在网络上各位置出现的概率相当,属于随机型分布模式。从城市规划的角度,这类现象可以解释为:垃圾污水站与人们生活密切相关,随机型分布可以照顾到居住在不同区域的城市人口,有利于垃圾的及时清理和回收,保证城市环境的整洁。对于图9(b)中的稀疏型分布密度图,主要区域内墙的高度均比较低,不存在高墙类型的局部特征。产生这类现象的原因可能是图书馆属于城市基础服务设施,集中分布会导致资源浪费,它的建设选址应能满足城市各社区居民的文化需求,顾及整个城市空间。图9(c)所示的密度分布模式则属于区域密集型,其中西南、南部区域存在突出的高墙密度特征。通常,银行网点分布集中的区域可视为城市发展的金融热点,从密度图中可以看到深圳市的经济活动主要位于前海中心以及福田—罗湖中心,具有块状集聚、轴状延伸的格局,与深圳市总体规划内容吻合。加油站如图9(d)中的密度分布属于线状密集型,其密度高墙主要是沿深圳市区的主干道排列,即机荷高速、京港澳高速、广深高速、沈海高速、水官高速以及滨海大道、北环大道。加油站为经营类设施,它的建设选址以局部交通量为依据,由于深圳市内机荷高速等主干路是交通量最大的几个路段,所以加油站呈线状密集分布模式符合市场竞争规律。

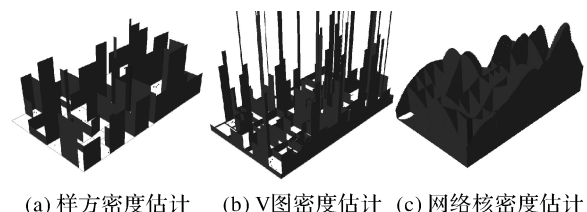
为了评价核密度估计与样方法、V图密度估计对POI分布的表达效果,图10选择深圳市CBD即罗湖中心区作为研究区域,银行设施POI作为试验数据,样方法以网络弧段作为点数据的聚合单元,V图密度估计则采用网络V图的构造方法^[13]。这里选择数值离散度、非正常单元个数以及极值单元个数来评价3种方法,如表1所示(μ 为平均值; σ 为标准差)。其中核估计的数值离散度最大,分布较均匀,说明大部分位置间的密度值存在差异,且突变情况较少;样方法估计的数值离散度次之;V图估计由于将POI点周围的密度视为一致的,使得估计值主要分布于少数数值

区间内。根据数值离散度指标,核密度估计对街道内部的服务分布差异表现得最为细致^[21-23]。样方法由于将POI点的服务范围限制于单个弧段内,导致部分街道上的密度值为0,产生非正常单元。由表1可见,样方估计结果中46%数目的统计单元是非正常单元,即表示它们所处的位置不存在商业服务分布,这显然不符合城市CBD内金融服务分布的情况^[24]。另外,基于V图的密度结果中有16个单元为极值单元,这些也是不符合现实情况的,因为在罗湖中心区内各地段的金融服务强度都是高度饱和的,并不允许区域与区域之间的商业分布差异如此悬殊。从以上3个评价指标来看,核密度估计不存在非正常估计值单元、极值单元情况,并且在计算结果中,密度在单元间的过渡较平滑,数值的总体分布更均匀,能更细致地表达设施服务在空间细部上的分布情况。

表1 研究区域3种密度估计的评价指标

Tab.1 Evaluation index of three density estimation methods

| 评价指标 | 样方法 | V图密度估计 | 核密度估计 |
|---------------------------------------|------------|--------|--------|
| 数值离散度 | 中 | 小 | 大 |
| 非正常单元个数 (密度值=0) | 1002 (46%) | 0 (0%) | 0 (0%) |
| 极值单元个数 (密度值 $\geq \mu + 4\sigma$) | 0 | 16 | 0 |



(a) 样方密度估计 (b) V图密度估计 (c) 网络核密度估计

图10 以银行设施POI为例,比较3种密度估计的分析结果

Fig.10 The comparison of the three density estimation methods with choosing the bank facility POI as an example

4 结 论

在城市网络空间中,设施点的服务功能及相互联系发生于网络路径而非传统的欧氏距离,仍然采用欧氏距离进行空间分析是不合理的。鉴于此,本文研究了基于最短路径距离的核密度计算方法,并以深圳市4类不同分布特点的设施为例,实现了基于网络核密度的设施分布密度三维可视

化。通过对试验结果的分析,得到下面的结论:

(1) 核密度法是以地理学第一定律为理论依据探讨点集的空间分布规律,比较样方密度法以及基于 V 图的密度计算方法,核估计的数值离散度最大,密度值在单元间的过渡更平滑,不存在非正常估计、极值估计等问题,适合于分析设施服务空间分布的连续性特征。

(2) 本研究给出的约束型核密度估计模型既能考虑地理实体的空间属性(如空间位置关系等),又能充分考虑地理实体的非空间属性,如道路等级、综合实力等,可应用于精度要求较高的网络空间分析。

(3) 网络核密度法中距离衰减阈值取决于数据的离散程度、POI 设施性质以及设施分布分析的应用尺度。

(4) 网络核密度法是城市空间应用中的一个重要的统计分析方法,它可以对城市 POI 设施分布特征进行分析,并用三维立体可视化形式展示分布热点、分布密度、分布趋势等特征,为城市规划及城市管理提供决策支持。

然而对于大数据量的 POI 网络计算,样方法与基于 V 图的密度法由于算法原理简单,效率较核密度法更高。后续研究将考虑几何算法的分治(divide-and-conquer)办法或其他优化处理策略,通过建立栅格切片将耗时的核密度计算分解为多个独立的并行过程,提高算法效率。

参考文献:

- [1] LI Deren, NII, NSDI and Digital Earth[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 1999, 28(1): 32-37. (李德仁. 信息高速公路、空间数据基础设施与数字地球[J]. 测绘学报, 1999, 28(1): 1-5.)
- [2] XU Xueqiang, ZHOU Yixing, NING Yuemin. *Urban Geography*[M]. Beijing: Higher Education Press, 1997. (许学强, 周一星, 宁越敏. 城市地理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1997.)
- [3] BAILEY T, GATRELL A. *Interactive Spatial Data Analysis* [M]. Harlow: Longman, 1995.
- [4] SCHABENBERGER O, GOTWAY C A. *Statistical Methods for Spatial Data Analysis*[M]. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 2005.
- [5] OLIVEIRA D P, GARRETT JR J H, SOIBELMAN L. A Density-based Spatial Clustering Approach for Defining Local Indicators of Drinking Water Distribution Pipe Breakage[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2011, 25(2): 380-389.
- [6] KRISP J M, DUROT S. Segmentation of Lines Based on Point Densities: An Optimisation of Wildlife Warning Sign Placement in Southern Finland[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2007, 39(1): 38-46.
- [7] DELMELLE E C, THILL J C. Urban Bicyclists: Spatial Analysis of Adult and Youth Traffic Hazard Intensity[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2008, 2074(1): 31-39.
- [8] XIE Z, YAN J. Kernel Density Estimation of Traffic Accidents in a Network Space[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2008, 32(5): 396-406.
- [9] MILLER H J. Market Area Delimitation within Networks Using Geographic Information Systems[J]. *Geographical Systems*, 1994, 1(2): 157-173.
- [10] OKABE A, OKUNUKI K, SHIODE S. SANET: A Toolbox for Spatial Analysis on a Network[J]. *Geographical Analysis*, 2006, 38(1): 57-66.
- [11] OKABE A, YAMADA I. The K-function Method on a Network and Its Computational Implementation [J]. *Geographical Analysis*, 2001, 33(3): 271-290.
- [12] YAMADA I, THILL J. Local Indicators of Network-constrained Clusters in Spatial Point Patterns[J]. *Geographical Analysis*, 2007, 39(3): 268-292.
- [13] AI Tinghua, YU Wenhao. Algorithm for Constructing Network Voronoi Diagram Based on Flow Extension Ideas[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 42(5): 760-766. (艾廷华, 禹文豪. 水流扩展思想的网络空间 Voronoi 图生成[J]. 测绘学报, 2013, 42(5): 760-766.)
- [14] OKABE A, OKUNUKI K. A Computational Method for Estimating the Demand of Retail Stores on a Street Network and Its Implementation in GIS[J]. *Transactions in GIS*, 2001, 5(3): 209-220.
- [15] OKABE A, SATOH T, FURUTA T. A Kernel Density Estimation Method for Networks, Its Computational Method and a GIS-based Tool[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2009, 23(1): 7-32.
- [16] BORRUSO G. Network Density Estimation: Analysis of Point Patterns over a Network [C] // *Computational Science and Its Applications: ICCSA 2005*. Singapore: Lecture Notes in Computer Science, 2005: 126-132.
- [17] BORRUSO G. Network Density and the Delimitation of Urban Areas[J]. *Transactions in GIS*, 2003, 7(2): 177-191.
- [18] BORRUSO G. Network Density Estimation: A GIS Approach for Analysing Point Patterns in a Network Space[J]. *Transactions in GIS*, 2008, 12(3): 377-402.
- [19] SHEATHER S J, JONES M C. A Reliable Data-based Bandwidth Selection Method for Kernel Density Estimation[J]. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B: Statistical Methodology*, 1991, 53(3): 683-690.
- [20] ELGAMMAL A, DURAIWAMI R, HARWOOD D, et al. Background and Foreground Modeling Using Nonparametric Kernel Density Estimation for Visual Surveillance [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2002, 90(7): 1151-1163.

- [21] ECK J, CHAINEY S, CAMERON J, et al. Mapping Crime: Understanding Hotspots [EB/OL]. 2005 [2013-08-14]. <http://discovery.ucl.ac.uk/11291/1/11291.pdf>
- [22] O'SULLIVAN D, UNWIN D J. Geographic Information Analysis[M]. New York: John Wiley & Sons, 2003.
- [23] LU Anmin, LI Chengming, LIN Zongjian, et al. Spatial Continuous Surface Model of Population Density[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2003, 32(4): 344-348. (吕安民, 李成名, 林宗坚, 等. 人口密度的空间连续分布模型[J]. 测绘学报, 2003, 32(4): 344-348.)
- [24] CHEN Yixin. CBD Urban Planning and Implement[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006. (陈一新. 中央商务区(CBD)城市规划设计与实践[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.)

(责任编辑:丛树平)

收稿日期: 2013-12-03

修回日期: 2014-05-25

第一作者简介: 禹文豪(1987—),男,博士,研究方向为空间分析和空间数据挖掘。

First author: YU Wenhao(1987—), male, PhD, majors in spatial analysis and spatial data mining.

E-mail: ywh_who@126.com

通信作者: 艾廷华

Corresponding author: AI Tinghua

E-mail: tinghua_ai@tom.com

(上接第 81 页)

- [15] YANG Yuanxi. Properties of the Adaptive Filtering for Kinematic Positioning[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2003, 32(3): 189-192. (杨元喜. 动态定位自适应滤波解的性质[J]. 测绘学报, 2003, 32(3): 189-192.)
- [16] YANG Yuanxi, CUI Xianqiang. Influence Functions of Colored Noises on Kinematic Positioning; Taking the AR Model of First Class as an Example[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2003, 32(1): 6-10. (杨元喜, 崔先强. 动态定位有色噪声影响函数: 以一阶 AR 模型为例[J]. 测绘学报, 2003, 32(1): 6-10.)
- [17] JIANG Sanping. Image Denoising Based on Wavelets Translation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009. (姜三平. 基于小波变换的图像降噪[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.)
- [18] JALOBÉANU A, BLANC-FÉRAUD L, ZERUBIA J. Satellite Image Deblurring Using Complex Wavelet Packets[J]. International Journal of Computer Vision, 2003, 51(3): 205-217.
- [19] JALOBÉANU A, ZERUBIA J, BLANC-FÉRAUD L. Bayesian Estimation of Blur and Noise in Remote Sensing Imaging[C] // Blind Image Deconvolution: Theory and Applications. London: CRC Press, 2007: 239-271.
- [20] ZHANG Yan, MAN Yiyun. Satellite Image Adaptive Restoration Using Periodic Plus Smooth Image Decomposition and Complex Wavelet Packet Transforms[J]. Tsinghua Science and Technology, 2012, 17(3): 337-343.
- [21] ZHANG Yan, LI Xianying, MAN Yiyun. Remote Sensing Images Upsampling Based on Projection onto Convex Sets

and Complex Wavelet Packet Transfer[J]. Chinese Journal of Computers, 2011, 34(3): 482-488. (张砚, 李先颖, 满益云. 基于凸集投影法和复数小波包域的遥感图像上采样研究[J]. 计算机学报, 2011, 34(3): 482-488.)

- [22] LINDA G S, GEORGE C S. Computer Vision[M]. ZHAO Qingjie, QIAN Fang, CAI Lidong, Translated. Beijing: China Machine Press, 2005. (LINDA G S, GEORGE C S. 计算机视觉[M]. 赵清杰, 钱芳, 蔡利栋, 译. 北京: 机械工业出版社, 2005.)

- [23] XIAO Pengfeng, FENG Xuezhi, ZHAO Shuhe, et al. Segmentation of High-resolution Remotely Sensed Imagery Based on Phase Congruency[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2007, 36(2): 146-151, 186. (肖鹏峰, 冯学智, 赵书河, 等. 基于相位一致的高分辨率遥感图像分割方法[J]. 测绘学报, 2007, 36(2): 146-151, 186.)

- [24] IRONY R, COHEN D, LISCHINSKI D. Colorization by Example[C] // Proceedings of Eurographics Symposium on Rendering. Konstanz: [s.n.], 2005.

(责任编辑:宋启凡)

收稿日期: 2014-01-07

修回日期: 2014-09-13

第一作者简介: 张砚(1975—),女,博士后,主要研究方向为遥感数字图像处理、计算机图形学、时空数据库。

First author: ZHANG Yan(1975—), female, postdoctor, majors in remote sensing digital image processing, computer graphics and spatio-temporal database.

E-mail: zy_amethyst@163.com