

# 网络约束点格局分析研究综述

聂可<sup>1,2</sup>, 王振声<sup>3</sup>, 杜清运<sup>4\*</sup>, 罗平<sup>1,2</sup>

(1. 深圳市数字城市工程研究中心, 广东 深圳 518034; 2. 国土资源部城市土地资源监测与仿真重点实验室, 广东 深圳 518034; 3. 深圳大学空间信息智能感知与服务深圳市重点实验室, 广东 深圳 518060; 4. 武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430079)

**摘要:**随着信息通信技术高速发展,地理相关大数据使得传统的空间分析面临着机遇与挑战。平面空间分析方法在分析网络空间点要素空间过程、揭示其空间分布时的弊端日益凸显,由此对探索网络约束点要素特定的分析方法的关注度不断提高。本文定义了网络约束的思想,详细阐述了网络约束点格局分析方法体系,并分别从网络约束点格局的理论和应用出发,梳理了网络约束点格局分析的一阶方法、二阶方法及其他方法上的研究进展,总结了网络约束点格局分析在交通安全领域、犯罪学领域和其他城市点要素中的典型应用,最后在方法与应用层面,讨论近年重要的研究动向及未来的发展趋势。

**关键词:**网络约束;点格局分析;网络约束建模;理论发展;点格局应用研究

## 1 引言

大数据的蓬勃发展,地理相关大数据的产生为地理空间分析的发展提供了巨大的数据基础,也带来机遇和挑战(王劲峰等, 2014)。空间分析是分析地理相关数据的一系列技术,空间格局分析作为空间分析中最重要的内容,用于描述空间个体某一时刻在空间的散布状态,是地理学及其交叉学科中广泛关注的主题。空间格局分析的方法很多,包括样方法、点格局分析法、分形理论等,其中,点格局分析方法将每个个体抽象为二维空间中的点,可分析任意尺度的空间分布格局,是最常用的空间格局分析方法。平面点格局分析的理论与方法是以“理想空间”假设为前提,即用欧氏距离度量的无边界齐次空间。然而,现实世界中,“理想空间”通常并不存在,多种事件或实体的发生受到网络约束,如道

路网络上的机动车碰撞、河流中的水生物、沿街 的商店等。同时,网络可以是有形的网络也可以是无形的网络,与其对应的对象或实体也呈现多种形态。研究表明,“理想空间”中的“绝对空间”(Gatrell, 1983)的观点不适合欧氏空间中自身的子空间问题,特别是对于网络约束事件或实体的格局分析,需要充分考虑到网络的特性,采用网络约束空间点格局分析的方法进行探讨(Yamada et al, 2010)。

近年来,网络约束(network-constrained)现象受到了学者们的关注。Yamada等(2007)以街道网络为例,正式定义了街道网络约束要素,即对于任何现象,如果其位置由街道地址表示,且其位置严格限定在该街道网络上,称其为街道网络约束要素,并根据该要素与街道网络的位置关系,分为街道网络上的要素和街道网络旁的要素。本文认为,空间

收稿日期:2017-01;修订日期:2017-07。

基金项目:国土资源部公益性行业科研专项(201411014-4);国家自然科学基金项目(41371427,41601407);国土资源部城市土地资源监测与仿真重点实验室开放基金资助课题(KF-2016-02-011)[Foundation: Special Scientific Research Fund of Public Welfare Profession of Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China, No.201411014-4; National Natural Science Foundation of China, No.41371427, No.41601407; Open Fund of Key Laboratory of Urban Land Resources Monitoring and Simulation, Ministry of Land and Resources, No.KF-2016-02-011]。

作者简介:聂可(1988-),女,湖北黄冈人,博士,助理研究员,主要从事城市定量分析与表达研究,E-mail: nieke@whu.edu.cn。

通讯作者:杜清运(1965-),男,湖北宜昌人,博士,教授,博导,主要从事地理信息理论与方法研究,E-mail: qydu@whu.edu.cn。

引用格式:聂可,王振声,杜清运,等. 2017. 网络约束点格局分析研究综述[J]. 地理科学进展, 36(10): 1196-1207. [Nie K, Wang Z S, Du Q Y, et al. 2017. A review of network-constrained point pattern analysis[J]. Progress in Geography, 36(10): 1196-1207.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2017.10.002

中任何要素,如果其自身的位置的改变受到网络的约束,那么则称该要素为网络约束要素,即广义的网络约束要素;对网络约束要素进行的分析则称为网络约束分析,对网络约束要素进行的格局分析称为网络格局分析。对于网络约束要素,点要素是最常见最直观的一类要素,对于网络约束点要素的格局分析称为网络约束点格局分析。本文主要阐述网络约束点格局分析的思想,并从网络约束点格局分析的理论 and 应用层面出发,梳理并概述其研究进展。

## 2 网络约束点建模与分析

### 2.1 网络与网络约束点建模

地学分析中,常用的两种概念模型为:①对象模型,即认为客观世界由离散的实体构成;②场模型,即认为客观世界是连续的场(Burrough et al, 1998)。网络约束建模是以传统空间分析理论框架为基础,网络地理世界由网络实体(network-like entities)和网络约束实体(network-constrained entities)构成,分别将传统的对象模型和场模型拓展到网络约束空间,对网络和网络要素分别进行建模,形成网络对象模型、网络要素对象模型、网络场模型、网络要素场模型。

#### 2.1.1 网络建模

网络是一种连通关系的概念模式,具有线状特征,由节点和连线构成。地理网络是地理空间中一种特殊的线状要素,由弧段(segments)、结点(nodes)、拐点(inflexion nodes)、站(stops)、中心(center)、障碍(barriers)等空间元素构成,有着不同的存在形式,如:具体网络和抽象网络、自然网络和人工网络等。在网络对象建模中,采用几何网络进行描述。假设地理网络对象由二维或三维空间的有限数量和有限长度的弧段构成,每个弧段由端点相连且两点间至少有一条网络弧段,定义端点集合为 $V$ ,  $V=\{v_1, \dots, v_n\}$ ,定义弧段集合为 $L$ ,  $L=\{l_1, \dots, l_n\}$ ,那么地理网络对象可以表示为 $N$ ,  $N=\{V, L\}$ 。地理网络对象 $N$ 是一种空间容器,即网络空间,其表达了网络对象的几何属性和拓扑属性,如图1所示。在网络场建模中,通常使用连续网络空间域中的场函数进行定义,可以表达比率(ratio)、间隔(interval)、尺度(scale)、名义尺度(nominal)等(Okabe et al, 2012)。

地理网络可用矢量数据模型和栅格数据模型进行存储,其中矢量数据模型最为常用,但是对于网络空间连续性变化属性的描述,采用栅格数据模式更为合理。网络栅格模型来源于平面栅格模型的扩展,将传统的像素的思想拓展到网络空间的格点,即使用相等的长度在弧段上取点。

#### 2.1.2 网络约束点建模

根据要素与网络的拓扑关系,可分为网络上的要素和网络沿线要素,要素可以是点要素、线要素、面要素,如图2所示。网络上的要素类型主要有点要素和线要素,点要素以点的形式存在于网络空间,如交通事故、交通信号灯、车辆等;网络上的线要素,以线的形式存在于网络空间,如道路沿线的地下管线等。网络沿线要素,其要素的抽象建模较为复杂,如沿街建筑物,可依据建筑物质心、建筑物入口等将其抽象为沿街的空间点,也可依据建筑物边线、建筑物中心线将其抽象成平行于沿街的空间线。此外,还存在网络空间与线状要素、面状要素的交叉现象。同样,可通过在点状、线状、面状目标附近建立估算值的场函数来表示网络约束要素,以场函数的方法对网络要素进行建模。

#### 2.2 网络点过程建模

网络约束空间点要素同平面空间点要素一样,其发生可能是必然也可能是偶然的。网络约束空间点要素的空间格局是其空间过程的一种实现,随

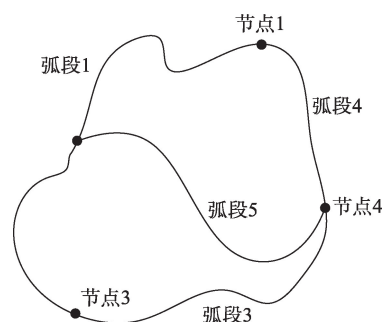


图1 地理网络空间的节点/弧段

Fig.1 Nodes and segments in geographical network space

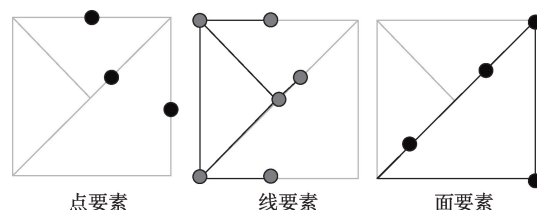


图2 网络中的点/线/面要素

Fig.2 Points/lines/subset networks in a network

机零假设是网络空间分析的基础,可分别建立网络对象随机空间模型和网络场随机空间模型。本文主要讨论的网络对象随机模型主要是针对网络空间点要素对象,点要素的空间随机过程包括属性要素的随机、空间要素的随机,亦即是点要素的属性随机而空间位置固定、点要素的属性固定而空间位置随机(即随机空间过程)、点要素的属性随机且空间位置随机(即归一化空间过程)。那么网络约束空间点过程可以作如下定义:

令  $\tilde{L}$  为欧氏空间中的有限网络空间,  $\tilde{L} = \bigcup_{i=1}^n l_i$ ,  $x$  是网络空间中任意一个空间点,且  $x \in \tilde{L}$ ,  $L_s$  是  $\tilde{L}$  空间内任意一个子集,且  $L_s \subseteq \tilde{L}$ , 定义  $f(x)$  为  $\tilde{L}$  域内点  $x$  的实值函数映射,定义  $N$  是  $L_s$  上空间点过程的计数过程,  $N$  的表达如下:

$$N = \{x_i\} \text{ 或 } N = \{x_1, x_2, \dots\} \quad (1)$$

$S$  为空间点过程的总和,其定义如下:

$$S_f = f(x_1) + f(x_2) + \dots = \sum_i f(x_i) = \sum_{x \in N} f(x) \quad (2)$$

式中:  $f$  是实值函数映射,是点过程  $N$  的一次实现,  $\sum_{(i)}$  表示  $N$  上点实现的总和。

如果函数  $f$  满足  $0 \leq f(x) \leq \infty$ , 且  $\int f(x)dx = 1$ , 那么函数  $f(x)$  则是概率密度函数,即过程强度函数,其空间过程则为二项网络空间点过程。令  $n(L_s)$  为空间点过程中点的个数,那么其概率可以表示为:

$$P[n(L_s) = k] = C_n^k \left( \int_{x \in L_s} f(x)dx \right)^k \left( 1 - \int_{x \in L_s} f(x)dx \right)^{n-k} \quad (3)$$

如果过程强度函数  $f$  为常数,那么该过程为均匀二项网络空间点过程,也即是网络完全空间随机点过程(即网络 CSR 点过程);如果过程强度函数  $f$  为连续函数,那么该点过程则为非均匀二项网络空间点过程(Okabe et al, 2012)。

## 2.3 网络约束点格局的分析思路

网络约束点格局是特定网络空间点过程的结果,空间数据、空间模式、要素地图均是点过程可能的一种实现。空间点格局分析关注观测点要素在地图上分布,一方面揭示空间点要素分布的表征形式,即随机、规则、聚集;另一方面,描述同类或不同种类点要素空间相关性,可分为基于一阶特性的方法(first-order effect)和基于二阶特性的方法(second-order effect)。其中,一阶特性是针对点对象的潜在特性,度量其空间过程的均值的全局变化,如样条分析法、核密度估计法等;二阶特性主要针对点要素的空间模式,度量空间过程的局部偏差进而探测

其空间交互结构,如最邻近统计、高/低聚类、多距离空间聚类分析、F 函数等(Bailey et al, 1995; O'Sullivan et al, 2003)。如果点要素的空间过程统计量(如均值、方差、协方差等)不依赖空间绝对位置,那么则认为该空间过程是平稳的(homogeneous point process);如果点要素的空间过程统计量随着空间位置变化而变化,那么则认为该空间过程是非平稳的(heterogeneous point process)。空间过程的一阶特性和二阶特性可形成类似的空间分布模式,但清楚判别二者之间的差别较困难,目前在常用的空间统计方法中往往只是探讨一种特性而暂时不考虑另一种特性(Yamada et al, 2004)。

网络空间点格局分析的基本思路为:进行空间描述性测度,包括一阶效应测算或二阶效应测算;建立完全随机假设;进行空间统计推断,判断观测模式的异常程度,其分析框架如下(图3):

### 2.3.1 网络约束空间点格局的趋势描述

网络约束空间点格局的趋势描述对平面点格局分析方法的扩展,即是采用基于密度的方法和基于距离的方法对网络空间点的分布情况进行探测。网络密度法主要是对网络空间点格局的一阶效应进行测度,通过对观测值的空间分布密度的量化来实现,即将整个研究区域按照网络距离的方式划分为若干单元,在每个单元周围建立网络邻域来计算其密度,其中比较有代表性为网络核密度估计法;基于距离的方法主要是对网络约束点格局的二阶效应进行测度,是通过对点之间的距离进行测度来实现,具有代表性的是网络最邻近距离法。

### 2.3.2 网络约束空间点格局的空间统计推断

网络约束空间点格局的描述可以在某种程度上揭示空间点模式的分布特点,但由于缺乏严格的统计推断,无法对空间分布的聚集程度的进行定量评估(O'Sullivan et al, 2013)。在网络空间点格局分

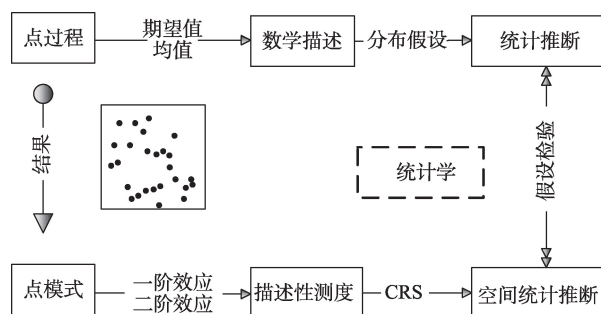


图3 网络空间点格局分析的基本框架

Fig.3 Framework for point pattern analysis in network space



析过程中,通常采用假设检验的方法,根据观测模式的测度,来推断产生该观测模式的概率,即推断观测模式的空间过程。统计检验的一般过程为:首先对观测模式提出零假设,然后选择假设检验的显著性水平,分别求出并比较临界值和检验统计量的实际值,从而判断拒绝或接受零假设。地理分析中的可用数据常是研究区域内的枚举普查数据,零假设主要是通过随机化零假设和归一化零假设来实现。随机化零假设认为,假设观测的空间模式是空间过程的结果之一,观测值固定而观测值的空间排列不固定;归一化零假设认为假设观测模式是从更大的总体中通过随机抽样获得的,观测值和观测值的排列均不固定,并要求数据值正态分布。在网络空间点格局统计推断中,常常使用空间随机零假设,根据空间点过程的特点选择不同的随机过程模型,包括:完全空间随机过程模型(CSR)、Cox过程、Markov point processes 过程模型。通常情况下,对观测模式提出完全随机模式零假设,即假设空间点过程为同质泊松过程,每个要素在研究区域的任何位置上出现的概率相等,且相互独立,通过计算并比较观测值和期望值,进行显著性检验,从而判断空间过程是随机分布、聚类分布或均匀分布。其中,CSR假设的显著性检验方法包括 Monte Carlo 检验、K-S 检验(王远飞等, 2007)。

### 3 网络约束点格局分析的理论研究进展

网络约束现象作为一种独特的地理形态,网络约束点格局分析是以平面格局分析为基础,其随点格局分析理论的发展而发展。网络约束点格局分析方法主要是针对网络约束点要素的一阶特性和二阶特性展开研究。以下分别对点格局分析、网络约束点格局分析理论发展与网络约束点格局分析方法三个层面的研究情况进行阐述。

#### 3.1 点格局分析的理论发展

20世纪50年代末到60年代初,随着地理学古典范式的衰落,空间分析范式的兴起,空间点格局分析被首次提出,其借用植物生态学领域的空间格局描述,针对人口分布(King, 1962)、城市零售店的空间位置分析(Rogers, 1965)、冰河时期的冰丘分布(Trenhaile, 1971)等进行应用分析,继而逐渐应用于

生物统计(Bartlett, 1975)、地统计(Cressie, 1993)、空间统计(Diggle, 1983)等其他领域。点对象空间格局分析的理论思想首次由Ripley在皇家统计会提出(Ripley, 1977),随后Diggle等对其进行完善,从而能够直观地表达不同尺度下的空间点格局(Diggle, 1983)。然而,由于零假设与现实的差异、分析软件的缺乏、数据未能有效空间化等原因,空间点格局分析作为应用地理领域的重要分支,并没有得到地理领域的重视(Gatrell et al, 1996)。近年来,随着地理信息系统技术的发展,空间点格局分析重新受到关注,在空间流行病学(Gatrell et al, 1996)、生态学(Perry et al, 2006)等领域得到了广泛的应用,并形成了大量的点格局分析、建模、可视化工具集,如:Sp-Pack(Perry, 2004)、Geoda(Anselin et al, 2006)、SaTScan(Coleman et al, 2009)等。

#### 3.2 网络约束点格局的提出与发展

在点格局分析中,假设点要素为平面上随机点过程。然而,点要素所在的地理空间并不能总满足欧氏距离下连续空间的假设。例如,顾客不可能直接通过欧氏距离抵达沿街商店,而必须通过路径距离沿着道路抵达商店。因此,连续平面空间的假设对于分析二维空间的子空间来说条件过于苛刻,传统的空间分析方法不一定适用于网络约束要素的分析(Miller, 1999)。网络点要素格局的定性分析可追溯到罗马人依据罗马道路的走向选择殖民地,网络点要素格局的定量分析则出现在Snow(1855)绘制的伦敦沿着Broad街和Golden广场的霍乱分布地图。然而,由于街道网络数据的缺乏、计算机管理和分析技术的不足,网络约束点格局的研究一直比较匮乏(Shiode et al, 2013)。随着GIS和几何计算的发展,对于网络约束点格局的发展逐渐取得进展(Toussaint, 1985; Maguire et al, 1991),得到了地理学家、物理学家、社会学家的高度重视,形成了GeoDaNet、SANET工具包,并展开了系列应用(Okabe et al, 2006; Boots et al, 2007; Yamada et al, 2007; Borgatti et al, 2009; Sugihara et al, 2011; Okabe et al, 2012; Jiang et al, 2014)。特别是,在新兴数据获取技术和多样数据分析工具的推动下,subarea-based(meso-scale)的传统经验空间分析方法,正在逐渐向更小尺度的object-based(micro-scale)空间分析过度(Okabe et al, 2012),而从宏观尺度到微观尺度过度的重要标志则是二维或三维欧氏空间中的网络约

束点格局分析,对网络约束点要素进行分析和表达是地理信息科学研究中的主要问题之一(Batty, 2005)。

### 3.3 网络约束点格局的分析方法

#### 3.3.1 网络一阶分析方法

核密度估计方法作为空间点格局分析的重要方法,逐渐被拓展到网络空间,并在网络约束点格局一阶分析中得到了广泛应用。Flahaut等(2003)率先设计了一种基于简单网络的核密度估计方法,但是其网络复杂度相对较低;随后,Borruso(2005)也提出基于网络距离密度函数的核密度估计方法,并证实该方法可以定位网络上的线性聚类,并可更精确表达网络约束要素的分布模式,但是该方法对网络自身及网络所在的区域依赖性较高。同样,Downs等(2007a, 2007b)通过两个网络核密度估计的案例应用,充分阐释了网络核密度估计在解决网络约束问题的优越性,其一是将城市道路网络的交叉口网络密度作为城市中心性的度量指标,其二是通过分析动物移动轨迹网络来估算动物居所的范围。Xie等(2008)证实网络约束核密度估计方法比传统的平面核密度估计方法更适合分析网络约束要素,并将其应用到交通事故分析中,还指出核密度估计中剖分粒度和搜索半径的重要性。由于缺少关于核密度估计值偏差的讨论,Nie等(2015)将道路网络进行等距离划分,使用一种组合式的网络核密度估计方法进行点格局分析,弥补了核密度估计方法缺少统计检验的不足;Okabe等(2009)定了三种不同类型的核函数,即网络普通核函数、网络连续核函数、网络非连续核函数,不仅对不同核函数估计值的偏差和计算复杂度进行度量,而且形成了基于GIS的网络核密度估计工具用以辅助应用,但是提出的三种核函数却不可以同时保证估计无偏,同时全部满足其提出的七种属性,如,核中心对称、等距离、等密度等。随后,Sugihara等(2010)又对equal-split核函数进行了修正,从而满足了网络短环路情况下的无偏性。

随着网络核密度估计方法的优势逐渐体现,学者们开始尝试将网络核密度的方法应用到城市地理学方面。Yu等(2015)采用网络核密度方法对城市中心商业区进行分析和界定;Timothée等(2010)采用网络核密度方法对零售店和金融服务活动进行分析,提出了人类活动密度指标,将该指标修正为可以表征城市中心的网络性能的重要参数。La-

chance-Bernard等(2011)用网络核密度方法探测卢布尔雅那地区的自行车热点位置,从而辅助规划者进行自行车设施的最优化配置。Rui等(2016)使用网络核密度方法对城市尺度的沿街零售业热点区域进行探测,并对品牌的零售店进行聚类分析,从而为新零售店的最优选址提供参考。

此外还有一些其他网络点格局一阶分析方法的相关研究。例如,Steenberghen等(2010)将网络分割成不同的统计单元,使用网络距离度量空间点要素的空间邻近度,计算每个空间单元上的点要素聚集情况,并使用蒙特卡洛方法对聚类的统计显著性进行评价。

#### 3.3.2 网络点格局二阶分析方法研究

网络点格局的二阶分析方法主要是度量空间点要素的局部偏差与空间交互结构。Goodchild(1986)认为网络空间自相关的度量有以下两种情况:一种是使用网络弧段值代表两个节点间某变量的相似性度量,变量可以是城市、区域、乡村或者其他空间单元,这种情况与传统空间自相关分析相似,Doreian(1990)通过使用社会变量表示个体和社会网络的链接,用社会网络自相关案例进行了实证分析;另一种是链自身属性值的空间自相关,也就是真正意义的自相关,其权重矩阵反映链的连通、链的邻接、网络距离。Black(1992)也认为空间自相关和网络自相关是两种不同的现象,空间自相关的邻居是连续空间上用欧氏距离度量的邻居,而网络自相关是网络空间上的用网络距离度量的邻居,首次提出网络自相关的概念,并将Moran's I方法扩展到网络空间。Yamada(2004)提出了网络约束聚类局部统计量的思想,分别讨论网络空间单个独立要素之间的相关性和网络空间单元本身的非可数的要素之间的相关性。

在网络点格局二阶分析具体的方法层面,Okabe等(1995)首先充分考虑点要素自身受网络约束这一特征,提出了离散网络上的随机点过程,即二项点过程、多项点过程、单变量二项点过程、多变量二项点过程,并以此为基础提出了四种统计方法,分析位置因素对网络约束的点分布的影响,即网络Clark-Evans统计、网络链的属性分类统计、单一设施对点分布的影响分析、多类型设施对点分布的影响分析。随后,Okabe等(2001)又将传统欧氏距离的无限平面K函数方法拓展为最短路径距离的有限网络空间K函数方法,分别提出网络K函数方法



和网络交叉K函数方法,并将其应用于沿街快餐店的分布研究中,此项研究表明网络K函数方法不仅理论有效而且计算有效,为网络空间点分布提供了有效的方法。随后,Yamada等(2004)在网络K函数的基础上,提出了局部K函数聚类统计量的计算方法,用来探测网络点事件空间显著性聚类趋势,并用以美国Buffalo地区高速公路机动车碰撞分布进行实例分析。Yamada等(2010)人进一步将平面Moran's  $I$ 统计和平面G统计扩展成为网络空间的Moran's  $I$ 统计和G统计。在此基础上,学者们开展了网络点格局分析二阶方法优化与实例验证,如:使用网络K函数进行沿街医院和药店格局的探测(Ni et al, 2016)、结合分层贝叶斯方法和网络局部聚类探测方法进行沿街兴趣点的分析(Wang et al, 2017)。

### 3.3.3 其他网络点格局分析方法

除了上述网络约束点格局分析的研究外,学者们将其他空间点格局分析方法进行网络空间扩展。在网络点格局聚类分析方面,Shiode(2008)提出网络样方方法进行网络约束点的聚类分析,通过计算并比较平面样方、网络样方结果的 $\chi^2$ 统计值、Moran's  $I$ 统计值,结果表明平面样方方法常常过度估计了空间格局的扩散态势,网络样方方法则可以通过网络样方聚类基本单元,更高效地刻画微观尺度数据,但是考虑到计算的复杂度,该方法仅在小地域范围内进行测试;此后,Shiode(2011)提出了基于街道网的时空分析方法和基于街道网空间扫描统计方法,并通过模拟数据和真实数据证实了该方法在监测街道级犯罪热点上具有更高的精度、敏感性、稳定性;近年来,Shiode等(2013)又提出了采用网络约束时空搜索窗的方法对街道尺度下犯罪事件热点进行探测,不仅大大拓展了网络时空分析方法的框架,而且能够更准确地检测街道尺度下要素在时间和空间上的聚集。在网络泰森多边形方面,Okabe等(2008)提出了加权网络Voronoi图的概念,用向内距离、向外距离分别进行加法、乘法加权最短路径距离,奠定了网络泰森多边形的理论基础,使得加权网络Voronoi图的方法逐渐推广应用到基于位置服务的最近邻查询上;艾廷华等(2013)提出了一种基于水流扩展的网络泰森多边形生成模型,用网络栅格单元长度为步长,以点为源头让水流沿着网络蔓延,充分考虑了网络图结构中的多种约束;She等(2015)结合网络核密度估计方法和网

络聚类局部统计量方法提出了两种改进式的网络权重泰森多边形的应用思想,充分考虑了网络约束点的分布格局对资源分配的影响。在网络空间插值方面,Shiode等(2011)将平面空间插值中的反距离权重插值和普通克里金插值扩展到网络空间,并用两种不同的网络格局对这两种方法进行交叉验证,比较均方误差之后发现:网络插值方法对边界效应的更敏感,网络插值方法的稳定性受样本点的个数影响较大,但可通过边界修正进行优化。在聚类分析方面,Sugihara等(2011)首次建立了基于网络约束的分层聚类的框架,提出采用不同距离度量方式,如最近邻对距离、最远对距离、平均距离、中值对距离、半径距离等的网络分层聚类方法,可根据聚类过程的需要或时间复杂度的需要选择合适的网络分层方式。

## 4 网络约束点格局分析的相关应用

### 4.1 机动车碰撞的点格局分析

机动车碰撞,是最典型的网络约束点现象,其空间格局及形成过程的定量化研究是交通及其交叉学科的研究热点,点格局分析在机动车碰撞中主要应用体现在机动车碰撞整体和局部格局分布探测(即热点探测)。

早期的交通事故研究中,学者们使用空间汇总数据的方式将交通事故分散到道路路段上,分别统计每个路段上交通事故的数目从而得到事故黑点。根据路段划分的方式不同,分为等距离路段划分和非等距离路段划分两种观点。研究表明,路段长度影响空间汇总数据分析的结果,路段长度的选择即是采用地理学方法分析交通事故中的可塑性面积单元问题。从统计验证的角度来说,等距离划分的方法更适用,学者们采用该方法进行了一系列对交通事故进行研究,如cell-count方法(使每段路上拥有一定数量的事故数)、equal-size方法(讨论等长度路段上的事故数量)等(Black, 1992)。在实际研究过程中,由于道路网络的节点和其链接的复杂性,等长度剖分道路网络常常会造成一些不满足基本道路长度的破碎路段,卢佩莹等(2011)提出了使用阈值的方法尝试解决等长度剖分中的短路段的问题。无论是等距离划分还是非等距离划分都是将事故数量作为汇总数据单元属性值,对于此类空间统计单元的属性值的分析通常采用空间自相关

的方法,为探测道路网络约束交通事故点要素的空间聚集性,学者们提出使用统计指数来表示交通事故的网络空间自相关(Black et al, 1998; Yamada et al, 2010)。

由于汇总数据带来的可塑性面积单元问题,随着GIS技术对事故获取方法的改善,学者们尝试是用非汇总数据,即单个事故数据,来研究道路网络上的交通事故问题(Loo, 2006)。非汇总数据交通事故分析的方法主要有四种:核密度估计方法、最邻近距离法、K函数法、聚类分析法。核密度方法采用钟形的密度函数产生密度表面,从而得到每个位置的事故密度值。Sabel等(2005)采用平面核密度估计方法研究了新西兰Christchurch地区的事故分布情况;Erdogan等(2008)也提出了使用GIS技术研究土耳其其Afyokarahisar地区交通事故情况,并使用核密度估计方法进行热点判断。Anderson(2009)结合核密度估计方法和K均值聚类的方法对英国伦敦地区1999-2003年的事故热点进行判别,取得了很好的实际效果。为解决平面核密度估计方法的不足,Xie等(2008)提出了使用网络核密度估计的方法;为解决网络核密度估计方法的统计显著性检验的缺乏,Xie等(2013)又提出使用局部统计对网络核密度估计结果进行评价的思路;Bil等(2013)则提出了分别对核密度估计结果进行聚类强度和聚类稳定性评价。同时,Loo等(2011)也使用基于GIS的网络约束核密度估计方法对上海市的交通事故进行分析。最邻近距离法则是通过统计每个点周围最邻近距离的事故数量,从而对事故黑点位置进行评价。Black(1991)首次使用最邻近距离对时空区域的交通事故进行分析,Steenberghen等(2004)修正了最邻近距离分析方法,在每个事故点定义一个网络距离半径,并统计该点的事故指数。K函数方法即是对最近邻距离的扩展,其应用也比较广泛(Jones et al, 1996; Yamada et al, 2004)。网络点聚类分析,为空间聚类分析的扩展,Yiu等(2004)提出了网络聚类分析的重要性,并建立了网络聚类分析的算法和数据结构;同样地,Clauset等(2008)提出了网络点的分层聚类分析。

#### 4.2 犯罪事件的点格局分析

犯罪事件是具有固定地理位置的一类典型的都市点事件,采用空间分析方法解决犯罪问题是犯罪学的重要分支,也是地理学应用的重要方面。研究表明,犯罪事件并不是随机发生的,其倾向于在

某些特定地方的集聚,而集聚地可解释为犯罪机会较大的区域或受害者与犯罪者频繁交互的区域(Cohen et al, 1979; Chainey et al, 2005)。通过对犯罪事件的进行格局分析,可了解犯罪的空间分布并定位犯罪热点(hot-spots),有利于警力的调配,进而可以高效地进行犯罪预防和犯罪侦察。目前,许多学者进行了关于犯罪事件的点格局研究,并形成了很多GIS-based的犯罪空间分析工具,包括商业化的软件包,如CrimeStat等,以及基于GIS平台的插件,如CRIMEVIEW等。最早的犯罪点格局分布研究出现在19世纪的法国,犯罪地图是犯罪信息可视化、犯罪事件分析的载体;随着计算机技术和GIS技术的发展,关于犯罪分布的研究得到了广泛的关注和发展,并相继成立专门的犯罪事件空间分布研究机构进行犯罪类城市点事件的地理学分析。同时,犯罪事件点格局的表达方法也从单纯性的点图、变量符号图、等值线图转变为可以表达时间和空间变化的动画图、3D图,分析方法也从传统的缓冲分析、标准误差椭圆等估计方法拓展到核密度估计、时空分析层面。McEwen等(1995)提出采用点图的三种基本的特性(描述、分析、交互)对犯罪事件进行描述和定位,但是该方法在处理相同位置多起事件的时候容易出现符号重叠。Goldsmith等(1999)提出在犯罪点事件数据量大的时候,采用核密度估计的方法可以更高效的进行热点探测。Brunsdon等(2007)提出并证实采用map animation方法、comap方法、isosurface方法对犯罪事件进行时空分析和可视化的可行性,并建议将该方法进一步推广到其他城市空间点事件的分析过程。Chainey等(2008)以犯罪历史数据为实验数据,采用人口普查区专题地图、空间椭圆、网格专题制图、核密度估计四种方法分别生成汽车盗窃、街头犯罪、车辆盗窃等热点地图,并估测不同方法生成的热点图的预测精度,结果表明核密度估计方法在分析不同类型犯罪事件中预测结果均最优。随着空间分析尺度从区域级或城市级向更精细化的街道级或者社区级发展,在街区级或街道网级的进行犯罪事件的空间格局分析即采用网络约束点格局方法进行犯罪事件分析,逐渐成为犯罪学微观分析的重要方面(Weisburd et al, 2009)。譬如,Lu等(2007)认为采用平面K函数的方法对网络约束下的城市活动进行空间自相关格局分析时,存在着一些误报问题,并提出使用网络K函数的方法对城市机动车盗窃案



进行分析。Shiode(2011)提出使用基于街道级的时空犯罪分析和空间扫描统计方法探测毒品事件、抢劫事件的犯罪热点,进而提出基于网络时空搜索窗的方法研究犯罪点事件(Shiode et al, 2013)。Tompson等(2009)提出了一种热路段的方法对网络上的犯罪风险分布进行度量,该方法通过计算每个路段的犯罪率实现热点的判断。

#### 4.3 其他网络约束点要素的格局分析

点格局分析不仅仅广泛应用于交通事故分析中,而且逐渐应用于其他网络约束点要素的分析。在生态学上,Spooner等(2004)使用网络核函数方法研究澳大利亚洛克哈特夏尔地区的刺槐种群分布;在城市路网研究方面,Furth等(2000)对公交线路上的公交站点距离进行分析。广义的网络上点包括建筑物内廊道的点和复杂设施上的通道上的点,一些学者尝试高层建筑内部的网络通行路径分析(Kwan et al, 2005)。

沿街分布的点要素在现实中非常普遍,特别在城市区域,如沿街商店。Yu等(2015)使用网络核密度估计对城市沿街ATM机的分布进行探测,根据分布情况对城市商业区进行评价;禹文豪等(2015)对网络空间下的POI进行可视化与分析;余冰等(2015)以网络约束的方法分析城市占道经营情况,从而提出合理的城市设施布局。Sevtsuk(2010)对英国剑桥和萨默维尔地区的零售店和食品店的分布进行了分析;Myint(2008)对美国诺曼市的银行、快餐店、学校、教堂等的分布进行分析。

丝绸之路也是典型的网络空间,学者们也尝试研究受丝绸之路约束的点要素分布情况。譬如,Li等(1990)研究了中国西北地区的丝绸之路沿线城市人口中血红蛋白异常分布;Xie等(2007)研究了丝绸之路的河西走廊中部的古城市分布。

## 5 结论与讨论

综上所述,网络约束现象作为地理环境中一种较为常见的现象,逐渐得到了地理学界和各交叉学科研究者的关注。计量地理学、几何地理学等领域的发展,促进了网络约束理论的发展,一方面对传统的欧氏平面空间分析模型进行了网络改进和优化;另一方面对特定的网络约束问题提出了新的算法和模型。同时,网络约束应用分析也取得了一系列的研究成果,特别是在运用网络空间点格局分析

进行交通事故黑点(区)、犯罪热点探测和分析方面的研究。但是,网络约束空间分析模型及方法依然存在着诸多不完善之处,以下分别从方法层面和应用层面讨论目前网络约束空间点格局研究中需要进一步解决和研究的问题。

#### 5.1 方法层面

在宏观方法层面,目前,虽然已经有些学者尝试研究网络约束点要素的空间特性,并努力将平面空间模型扩展到网络空间,以解决网络约束空间问题。但是,当前的网络约束点要素的研究主要是以某一类型要素为例,将某一种平面空间分析方法进行网络空间扩展,一方面讨论其方法的有效性,另一方面揭露该类点要素的网络分布特征,但鲜有学者针对某类网络约束点要素问题采用系统化的空间分析框架进行网络约束点要素的空间格局分布探测。在具体的方法层面,应进一步讨论不同类型网络空间权重矩阵对网络空间模型性能的影响,定量地讨论不同基本单元长度、搜索半径、研究尺度对网络空间模型性能的影响,寻找针对不同研究区域的最优模型参数尺度,进一步加强时空网络空间模型的构建,如时空网络核密度估计、时空网络局部空间统计方法等,探索网络空间约束点格局的时空变化。

#### 5.2 应用层面

针对某一典型应用,在空间格局的识别上,可从空间角度对点要素与网络情况进行多尺度分析,分别讨论微观尺度和宏观尺度下两者的相互作用;在格局成因探索上,可讨论对网络约束点格局及其影响因素的交互作用。以城市道路网络为例,需对更多类型的点要素的格局进行探测,从而综合评价道路沿线土地利用、社会经济情况;同时,应特别关注地理环境因素、土地利用因素、交通流量、路网通达性等对网络空间点格局的影响,并进行定量研究。

#### 参考文献(References)

- 艾廷华,禹文豪. 2013. 水流扩展思想的网络空间 Voronoi 图生成[J]. 测绘学报, 42(5): 760-766. [Ai T H, Yu W H. 2013. Algorithm for constructing network Voronoi diagram based on flow extension ideas[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 42(5): 760-766.]
- 卢佩莹,姚申君,吴健平,等. 2011. 基于GIS的道路热区鉴别方法[J]. 交通运输工程学报, 11(4): 97-102. [Loo B P Y, Yao S J, Wu J P, et al. 2011. Identification method of road hot zone based on GIS[J]. Journal of Traffic and Transport-



- tation Engineering, 11(4): 97-102.]
- O'Sullivan D, Unwin D J. 2013. 地理信息分析[M]. 赵永, 译. 北京: 科学出版社. [O'Sullivan D, Unwin D J. 2013. Geographic information analysis[M]. Zhao Y, Trans.. Beijing, China: Science Press.]
- 余冰, 朱欣焰, 苏科华, 等. 2015. 道路网约束下的事件时空交互检验方法研究[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 40(3): 353-356. [She B, Zhu X Y, Su K H, et al. 2015. Test methods for space-time interaction of events under road network constraints[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 40(3): 353-356.]
- 王劲峰, 葛咏, 李连发, 等. 2014. 地理学时空数据分析方法[J]. 地理学报, 69(9): 1326-1345. [Wang J F, Ge Y, Li L F, et al. 2014. Spatiotemporal data analysis in geography[J]. Acta Geographica Sinica, 69(9): 1326-1345.]
- 王远飞, 洪林. 2007. 空间数据分析方法[M]. 北京: 科学出版社. [Wang Y F, Hong L. 2007. Methods of spatial data analysis[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 禹文豪, 艾廷华. 2015. 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, 44(1): 82-90. [Yu W H, Ai T H. 2015. The visualization and analysis of POI features under network space supported by kernel density estimation[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 44(1): 82-90.]
- Anderson T K. 2009. Kernel density estimation and K-means clustering to profile road accident hotspots[J]. Accident Analysis & Prevention, 41(3): 359-364.
- Anselin L, Syabri I, Kho Y. 2006. GeoDa: An introduction to spatial data analysis[J]. Geographical Analysis, 38(1): 5-22.
- Bailey T C, Gatrell A C. 1995. Interactive spatial data analysis [M]. Harlow Essex, England: Longman.
- Bartlett M S. 1975. The statistical analysis of spatial pattern [M]. Netherlands: Springer.
- Batty M. 2005. Network geography: Relations, interactions, scaling and spatial processes in GIS[M]//Fisher P F, Unwin D J. Re-presenting GIS. Chichester, UK: John Wiley & Sons: 149-170.
- Bíl M, Andrášik R, Janoška Z. 2013. Identification of hazardous road locations of traffic accidents by means of kernel density estimation and cluster significance evaluation[J]. Accident Analysis & Prevention, 55: 265-273.
- Black W R. 1991. Highway accidents: A spatial and temporal analysis[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1318: 75-82.
- Black W R. 1992. Network autocorrelation in transport network and flow systems[J]. Geographical Analysis, 24(3): 207-222.
- Black W R, Thomas I. 1998. Accidents on Belgium's motorways: A network autocorrelation analysis[J]. Journal of Transport Geography, 6(1): 23-31.
- Boots B, Okabe A. 2007. Local statistical spatial analysis: Inventory and prospect[J]. International Journal of Geographical Information Science, 21(4): 355-375.
- Borgatti S P, Mehra A, Brass D J, et al. 2009. Network analysis in the social sciences[J]. Science, 323: 892-895.
- Borruso G. 2005. Network density estimation: Analysis of point patterns over a network[M]//Gervasi O, Gavrilova M L, Kumar V, et al. Computational science and its applications: ICCSA 2005. Berlin Heidelberg: Springer: 126-132.
- Brunsdon C, Corcoran J, Higgs G. 2007. Visualising space and time in crime patterns: A comparison of methods[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 31(1): 52-75.
- Burrough P A, McDonnell R A. 1998. Principles of geographical information systems[M]. Oxford, OH: Oxford University Press.
- Chainey S, Ratcliffe J. 2005. GIS and crime mapping[M]. Chichester, UK: John Wiley & Sons.
- Chainey S, Tompson L, Uhlig S. 2008. The utility of hotspot mapping for predicting spatial patterns of crime[J]. Security Journal, 21(1-2): 4-28.
- Clauset A, Moore C, Newman M E J. 2008. Hierarchical structure and the prediction of missing links in networks[J]. Nature, 453: 98-101.
- Cohen L E, Felson M. 1979. Social change and crime rate trends: A routine activity approach[J]. American Sociological Review, 44(4): 588-608.
- Coleman M, Coleman M, Mabuza A M, et al. 2009. Using the SaTScan method to detect local malaria clusters for guiding malaria control programmes[J]. Malaria Journal, 8(1): 68.
- Cressie N A C. 1993. Statistics for spatial data[M]. Chichester, UK: John Wiley & Sons.
- Diggle P J. 1983. Statistical analysis of spatial point patterns [M]. London, UK: Academic Press.
- Doreian P. 1990. Network autocorrelation models: Problems and prospects[M]//Griffith D A. Spatial statistics: Past, present, and future. Ann Arbor, MI: Institute of Mathematical Geography: 369-389.
- Downs J A, Horner M W. 2007a. Characterising linear point patterns[C]//Proceedings of the GIS Research UK Annual Conference (GISRUK 2007). Maynooth, Ireland: National University of Ireland.
- Downs J A, Horner M W. 2007b. Network-based kernel density estimation for home range analysis[C]// Proceedings of the 9th international conference on geocomputation. May-

- nooth, Ireland: National University of Ireland.
- Erdogan S, Yilmaz I, Baybura T, et al. 2008. Geographical information systems aided traffic accident analysis system case study: City of Afyonkarahisar[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 40(1): 174-181.
- Flahaut B, Mouchart M, San Martin E, et al. 2003. The local spatial autocorrelation and the kernel method for identifying black zones: A comparative approach[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 35(6): 991-1004.
- Furth P G, Rahbee A B. 2000. Optimal bus stop spacing through dynamic programming and geographic modeling [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1731: 15-22.
- Gatrell A C. 1983. Distance and space: A geographical perspective[M]. New York: Oxford University Press.
- Gatrell A C, Bailey T C, Diggle P J, et al. 1996. Spatial point pattern analysis and its application in geographical epidemiology[J]. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 21(1): 256-274.
- Goldsmith V, McGuire P G, Mollenkopf J H, et al. 1999. Analyzing crime patterns: Frontiers of practice[M]. Thousand Oaks, CA: SAGE Publications.
- Goodchild M F. 1986. Spatial autocorrelation: Concepts and techniques in modern geography[M]. Norwich UK: Geo Books.
- Jiang B, Okabe A. 2014. Different ways of thinking about street networks and spatial analysis[J]. *Geographical Analysis*, 46(4): 341-344.
- Jones A P, Langford I H, Bentham G. 1996. The application of K- function analysis to the geographical distribution of road traffic accident outcomes in Norfolk, England[J]. *Social Science & Medicine*, 42(6): 879-885.
- King L J. 1962. A quantitative expression of the pattern of urban settlements in selected areas of the United States[J]. *Tijdschrift voor Economische en Sociale Geografie*, 53: 1-7.
- Kwan M P, Lee J. 2005. Emergency response after 9/11: The potential of real-time 3D GIS for quick emergency response in micro-spatial environments[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 29(2): 93-113.
- Lachance-Bernard N, Produit T, Tominc B, et al. 2011. Network based kernel density estimation for cycling facilities optimal location applied to Ljubljana[C]//Murgante B, Gervasi O, Iglesias A, et al. *Computational Science and Its Applications- ICCSA 2011*. Berlin & Heidelberg: Springer: 136-150.
- Li H J, Zhao X N, Qin F, et al. 1990. Abnormal hemoglobins in the Silk Road region of China[J]. *Human Genetics*, 86(2): 231-235.
- Loo B P Y. 2006. Validating crash locations for quantitative spatial analysis: A GIS-based approach[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 38(5): 879-886.
- Loo B P Y, Yao S J, Wu J P. 2011. Spatial point analysis of road crashes in Shanghai: A GIS-based network kernel density method[C]//Proceedings of the 19th international conference on geoinformatics. Shanghai, China: IEEE: 1-6.
- Lu Y M, Chen X W. 2007. On the false alarm of planar K-function when analyzing urban crime distributed along streets [J]. *Social Science Research*, 36(2): 611-632.
- Maguire D J, Goodchild M F, Rhind D W. 1991. Geographical information systems: Principles and applications[M]. Harlow, UK: Longman.
- McEwen J T, Taxman F S. 1995. Applications of computer mapping to police operations[M]//Eck J, Weisburd D. *Crime and place*. Monsey, NY: Criminal Justice Press: 259-284.
- Miller H J. 1999. Measuring space-time accessibility benefits within transportation networks: Basic theory and computational procedures[J]. *Geographical Analysis*, 31(2): 1-26.
- Myint S W. 2008. An exploration of spatial dispersion, pattern, and association of socio-economic functional units in an urban system[J]. *Applied Geography*, 28(3): 168-188.
- Ni J H, Qian T L, Xi C B, et al. 2016. Spatial distribution characteristics of healthcare facilities in Nanjing: Network point pattern analysis and correlation analysis[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(8): 833.
- Nie K, Wang Z S, Du Q Y, et al. 2015. A network-constrained integrated method for detecting spatial cluster and risk location of traffic crash: A case study from Wuhan, China[J]. *Sustainability*, 7(3): 2662-2677.
- Okabe A, Okunuki K I, Shiode S. 2006. SANET: A toolbox for spatial analysis on a network[J]. *Geographical Analysis*, 38(1): 57-66.
- Okabe A, Satoh T, Furuta T, et al. 2008. Generalized network Voronoi diagrams: Concepts, computational methods, and applications[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 22(9): 965-994.
- Okabe A, Satoh T, Sugihara K. 2009. A kernel density estimation method for networks, its computational method and a GIS-based tool[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 23(1): 7-32.
- Okabe A, Sugihara K. 2012. Spatial analysis along networks: Statistical and computational methods[M]. Chichester, UK: John Wiley & Sons.
- Okabe A, Yamada I. 2001. The K-function method on a network and its computational implementation[J]. *Geographi-*



- cal Analysis, 33(3): 271-290.
- Okabe A, Yomono H, Kitamura M. 1995. Statistical analysis of the distribution of points on a network[J]. *Geographical Analysis*, 27(2): 152-175.
- O'Sullivan D, Unwin D J. 2003. *Geographic information analysis*[M]. Chichester, UK: John Wiley & Sons.
- Perry G L W. 2004. SpPack: Spatial point pattern analysis in Excel using Visual Basic for Applications (VBA)[J]. *Environmental Modelling & Software*, 19(6): 559-569.
- Perry G L W, Miller B P, Enright N J. 2006. A comparison of methods for the statistical analysis of spatial point patterns in plant ecology[J]. *Plant Ecology*, 187(1): 59-82.
- Ripley B D. 1977. Modelling spatial patterns[J]. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B: Methodological*, 39(2): 172-212.
- Rogers A. 1965. A stochastic analysis of the spatial clustering of retail establishments[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 60: 1094-1103.
- Rui Y K, Yang Z G, Qian T L, et al. 2016. Network-constrained and category-based point pattern analysis for Suguo retail stores in Nanjing, China[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 30(2): 186-199.
- Sabel C E, Kingham S, Nicholson A, et al. 2005. Road traffic accident simulation modeling: A kernel estimation approach[C]//*Proceedings of the 17th Annual Colloquium of the Spatial Information Research Centre*. Dunedin, New Zealand: University of Otago.
- Sevtsuk A. 2010. Path and place: A study of urban geometry and retail activity in Cambridge and Somerville, MA[D]. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology.
- She B, Zhu X Y, Ye X Y, et al. 2015. Weighted network Voronoi Diagrams for local spatial analysis[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 52: 70-80.
- Shiode N, Shiode S. 2011. Street-level spatial interpolation using network-based IDW and ordinary kriging[J]. *Transactions in GIS*, 15(4): 457-477.
- Shiode S. 2008. Analysis of a distribution of point events using the network-based quadrat method[J]. *Geographical Analysis*, 40(4): 380-400.
- Shiode S. 2011. Street-level spatial scan statistic and STAC for analysing street crime concentrations[J]. *Transactions in GIS*, 15(3): 365-383.
- Shiode S, Shiode N. 2013. Network-based space-time search-window technique for hotspot detection of street-level crime incidents[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 27(5): 866-882.
- Snow J. 1855. *On the mode of communication of cholera*[M]. London, UK: John Churchill.
- Spooner P G, Lunt I D, Okabe A, et al. 2004. Spatial analysis of roadside Acacia populations on a road network using the network K-function[J]. *Landscape Ecology*, 19(5): 491-499.
- Steenberghen T, Aerts K, Thomas I. 2010. Spatial clustering of events on a network[J]. *Journal of Transport Geography*, 18(3): 411-418.
- Steenberghen T, Dufays T, Thomas I, et al. 2004. Intra-urban location and clustering of road accidents using GIS: A Belgian example[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 18(2): 169-181.
- Sugihara K, Okabe A, Satoh T. 2011. Computational method for the point cluster analysis on networks[J]. *GeoInformatica*, 15(1): 167-189.
- Sugihara K, Satoh T, Okabe A. 2010. Simple and unbiased kernel function for network analysis[C]//*Proceedings of the 2010 international symposium on communications and information technologies (ISCIT)*. Tokyo, Japan: IEEE: 827-832.
- Timothée P, Nicolas L B, Emanuele S, et al. 2010. A network based kernel density estimator applied to Barcelona economic activities[C]//*Taniar D, Gervasi O, Murgante B, et al. Computational science and its applications: ICCSA 2010*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag: 32-45.
- Tompson L, Partridge H, Shepherd N. 2009. Hot routes: Developing a new technique for the spatial analysis of crime[J]. *Crime Mapping: A Journal of Research and Practice*, 1(1): 77-96.
- Toussaint G T. 1985. *Computational geometry*[M]. Amsterdam, Netherlands: North-Holland.
- Trenhaile A S. 1971. Drumlins: Their distribution, orientation, and morphology[J]. *The Canadian Geographer*, 15(2): 113-126.
- Wang Z S, Yue Y, Li Q Q, et al. 2017. Analysis of the spatial variation of network-constrained phenomena represented by a link attribute using a hierarchical Bayesian model[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(2): 44.
- Weisburd D, Bernasco W, Bruinsma G. 2009. *Putting crime in its place: Units of analysis in geographic criminology*[M]. Berlin, Germany: Springer.
- Xie Y C, Ward R, Fang C L, et al. 2007. The urban system in West China: A case study along the mid-section of the ancient Silk Road-He-Xi Corridor[J]. *Cities*, 24(1): 60-73.
- Xie Z X, Yan J. 2008. Kernel density estimation of traffic accidents in a network space[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 32(5): 396-406.
- Xie Z X, Yan J. 2013. Detecting traffic accident clusters with network kernel density estimation and local spatial statis-

- tics: An integrated approach[J]. *Journal of Transport Geography*, 31: 64-71.
- Yamada I. 2004. Analysis of spatial clusters when the phenomenon is constrained by a network space[D]. New York: University at Buffalo, the State University of New York.
- Yamada I, Thill J C. 2004. Comparison of planar and network K-functions in traffic accident analysis[J]. *Journal of Transport Geography*, 12(2): 149-158.
- Yamada I, Thill J C. 2007. Local indicators of network-constrained clusters in spatial point patterns[J]. *Geographical Analysis*, 39(3): 268-292.
- Yamada I, Thill J C. 2010. Local indicators of network-constrained clusters in spatial patterns represented by a link attribute[J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 100(2): 269-285.
- Yiu M L, Mamoulis N. 2004. Clustering objects on a spatial network[C]//*Proceedings of the 2004 ACM SIGMOD international conference on management of data*. New York: ACM: 443-454.
- Yu W H, Ai T H, Shao S W. 2015. The analysis and delimitation of central business district using network kernel density estimation[J]. *Journal of Transport Geography*, 45: 32-47.

## A review of network-constrained point pattern analysis

NIE Ke<sup>1,2</sup>, WANG Zhensheng<sup>3</sup>, DU Qingyun<sup>4\*</sup>, LUO Ping<sup>1,2</sup>

(1. Shenzhen Research Center of Digital City Engineering, Shenzhen 518034, Guangdong, China; 2. Key Laboratory of Urban Land Resources Monitoring and Simulation Ministry of Land and Resources of China, Shenzhen 518034, Guangdong, China; 3. Shenzhen Key Laboratory of Spatial Smart Sensing and Services, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China; 4. School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, Hubei, China)

**Abstract:** With the rapid development of information and communication technology, the explosive amount of spatial big data creates both opportunities and challenges in the field of spatial analysis. Shortcomings of the traditional analytic paradigm for spatial process and spatial pattern analyses of network-constrained spatial point event have been revealed. Therefore, many studies have attempted to develop novel approaches for network-constrained point event analysis. In this article, we first conceptually defined network-constrained phenomenon and presented in detail the methodological framework of network-constrained point pattern analysis. Then we generalized the development status of methods of network-constrained point pattern analysis, including first-order effect method, second-order effect method, among others, and summarized the present situation of typical applications in the research of traffic safety, criminology, and other point events in urban context. In the end, current trends and future directions are discussed with regard to research methods and applications.

**Key words:** network-constrained; point pattern analysis; network-constrained modeling; theoretical development; application of point pattern analysis