

基于空间分析的城市交通网络结构特征研究^{*}

段 杰¹, 李 江²

(1. 中山大学城市与区域研究中心, 广东 广州 510275;

2. 武汉大学资源环境科学学院, 湖北 武汉 430079)

摘 要: 城市交通网络是城市空间形态的基本骨架, 交通网络的定量研究是对城市空间形态可控参数研究的重要方面。在 GIS 平台上利用拓扑分析可确定交通网络的整体层次结构及复杂程度, 并可进一步分析交通网络的基本形态; 长度维数主要描述网络密度的变化情况; 而分枝维数主要描述网络内部结构的复杂程度及其连通情况。利用扩展维数分析城市交通网络结构有利于了解交通网络的动态变化过程。

关键词: 城市交通网络; 空间分析; 结构特征; 分形

中图分类号: P208 文献标识码: A 文章编号: 0529-6579 (2002) 06-0105-04

城市交通网络在城市发展中占有至关重要的地位, 对城市空间形态的演变起着骨架性作用。城市的发展在一定的自然环境与历史条件下, 应当根据城市经济发展水平选择科学合理的城市空间发展形态, 并实现空间形态参数的控制, 忽视分阶段城市空间形态参数的控制, 将会造成与环境、城市结构、城市功能不相协调的空间形态, 反过来又对城市的发展造成不良影响。

国内外对交通网络的研究大多建立在图论的基础上, 将城市交通网络抽象描述为拓扑图, 并用相关的度量指标进行描述^[1], 具体有: β 指数、回路数、 α 指数和 γ 指数, 另外还有非线性系数等量化指标。这些指标对定量研究交通网络的结构特征具有一定的积极作用, 但是却不能很好地描述交通网络结构的整体形态及复杂性。本文结合拓扑分析及分形理论, 在 GIS 技术的支撑下, 对城市交通网络结构特征进行定量分析和研究。

1 城市交通网络的拓扑分析

在 GIS 中, 构成图形的点、线、面具有拓扑性质, 点、线、面是基本的拓扑元素。由于点集拓扑学是研究图形在同胚变化下不变的性质, 所以它是研究 GIS 空间关系的理论基础。本文利用拓扑知识在 GIS 支撑下分析交通网络的空间层次结构。

城市平面结构的主要要素是地面交通线及由它构成的网络, 这个网络包括城市街道和具有通行能力的河道和铁路, 城市空间形态取决于这些约束条

件。网络分析中, 回路是最基本的拓扑要素, 它是由周长最小的分支构成的闭合环。无回路的网络称为树, 回路的总和构成骨架, 和骨架相分离的孤立回路称为岛。城市平面作为一个网络, 其结构由骨架和分支构成, 是典型的回路网络。

运用拓扑网络分析城市交通网的层次结构、复杂性及城市空间形态的组合情况。其具体方法是: 首先确定建成区 (或主城区) 的交通网络外界, 然后确定第一层拓扑等级: 对交通网络构成的每一个多边形, 考察其顶点或边是否与外界相连, 若相连, 则划分为第一等级 (第一级是回路集合的外环)。接着沿第一等级的内界对其它的多边形遍历, 凡是顶点或边与第一等级相连的回路构成第二等级的环。第三等级是沿着第二等级的内界进行遍历, 依次类推, 直到网络中全部回路都被赋予一个等级属性值为止。

拓扑网络中的等级反映了城市交通网络的整体复杂程度, 最高等级为网络的核心, 即理论上的城市交通枢纽, 等级数越高, 则城市交通网络越复杂; 对于单核城市, 等级数越高, 则城市空间形态越紧凑; 等级数越低, 交通网络结构越简单, 若出现 2 个以上核心, 城市形态则呈条带状。图 1 是以武汉市为例, 选取武汉市中环线为交通网络外界, 由快速干道、主干道及次要干道构成的拓扑网络多边形分为 7 级, 分析结果可以看到, 武汉市的网络结构较为复杂, 网络中心大概位于解放大道、江汉路及新华路的交界处, 在武昌有个亚中心, 网络等

* 收稿日期: 2002-05-09

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (49831030)

作者简介: 段杰 (1970 年生), 女, 讲师, 在读博士生; E-mail: eep00dj@student.zsu.edu.cn

级数为 5, 大概在洪山广场附近。整个交通网络形态呈紧凑型环状格网结构。

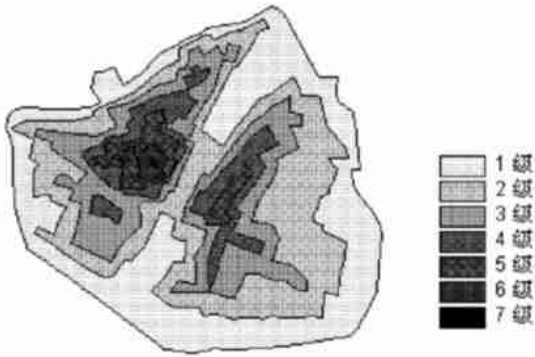


图 1 武汉市交通网络拓扑环示意图

Fig 1 Topology ring map of Wuhan traffic network

2 交通网络的分形特征分析

描述事物的空间形状与结构是认识客观世界的一项重要内容。受传统数学方法的限制, 对复杂的地理现象的形态、结构无法全面地了解。而分形几何的自相似性可以描述具有伸缩对称性而难以用欧氏几何描述的形态客体。这里我们用半径分析方法来描述交通网络的复杂程度。

2.1 长度维数及网络密度

分形维数刻画了客观事物内在性质的数量特征。一般地, 若客体的长度为 L , 面积为 S , 体积为 V 时, 则存在下列关系:

$$L \propto S^{1/2} \propto V^{1/3} \tag{1}$$

若把 L 扩大到 k 倍, 则 $S^{1/2}$ 和 $V^{1/3}$ 也扩大到 k 倍, 如把具有 D 维测度的量假定为 X , 则 (1) 式可表达为一般的关系式:

$$L \propto S^{1/2} \propto V^{1/3} \propto X^{1/d} \tag{2}$$

式中, L 为长度, S 为面积, V 为体积, X 为广义体积, 可以替代 L 、 S 、 V 中的任何一个。 $\propto$ 为成正比, d 为欧氏维数。当 $X=L$ 时, $d=1$; 当 $X=S$ 时, $d=2$; 如果研究客体具有某个测度的分形性质, 相应地 d 值为非整数, 这时 d 就变成分维 D_L 了。

如果在面积为 S 的城市内其交通网络长度具有分形性质, 则 (2) 式可表示为

$$L_{(r)}^{1/D_L} \propto S^{1/2} \tag{3}$$

当城市面积取圆时, $S \propto r^2$, (3) 式可表达为

$$L_{(r)}^{1/D_L} = kr \tag{4}$$

式中, r 为回转半径, $L(r)$ 为以 r 为半径的圆形区域内交通网络的总长度, k 为形状因子。对 (4) 式取对数得:

$$\ln L_{(r)} = D_L \ln k + D_L \ln r \tag{5}$$

对 (5) 进行线性回归, 得回归系数:

$$D_L = \frac{\sum_{i=1}^n \ln r_i \cdot \ln L_{r_i} - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \ln r_i \right) \left(\sum_{i=1}^n \ln L_{(r_i)} \right)}{\sum_{i=1}^n (\ln r_i)^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \ln r_i \right)^2} \tag{6}$$

D_L 即为所求的长度维数。长度维数的意义可做进一步的分析。对 (4) 求导变换, 可得出网络密度的衰减公式: $\rho_{(r)} \propto r^{D_L-2}$, 当 $D_L < 2$ 时, 交通网络密度随 r 的增大从网络中心向四周递减, 当 $D_L = 2$ 时, 交通网络分布密度均匀变化, 当 $D_L > 2$ 时, 网络密度从中心向四周递增。由此可见长度维数反映了交通网络密度从中心向四周变化的复杂程度^[4]。

以武汉市为例, 实验数据是在 Arc Info 8.0 的平台上获得, 以上述网络中心为圆心, 以等间隔递增长度为回转半径 r_i ($i=1, 2 \cdots n$), 计算每个半径范围内交通网络的总长度 $L_{(r)}$, 这里采集了 13 对数据 (见图 2), 将点对绘制在双对数坐标系中, 对其进行回归拟合, 并采用相关系数—拟合误差交叉法求得无标度区间 (见图 3)。可以看出, 武汉市的交通网络随回转半径的变化在一定区间具有自相似性, 其分维数为 1.45。

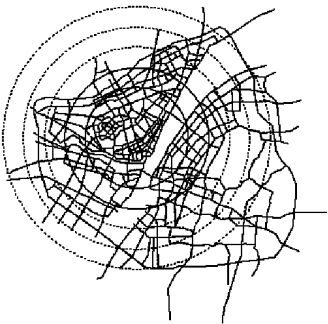


图 2 交通网络与回转半径示意图

Fig 2 Sketch map of traffic network and slewing radius

2.2 分形维数的扩展分析

客观世界不存在纯数学的理想分形, 存在的只是统计意义下的随机分形。因此, 自相似性仅出现在一确定的范围, 即无标度区, 在无标度区内存在着明显的自相似性。而无标度区以外的数据在研究中大多被忽视, 造成数据信息的丢失。另外, 半径分析属于局部分析方法^[5], 即一定的半径取值只能考察一定区域内的研究客体, 而不能遍及整个研究区域, 信息的采集具有一定的局限性。仅利用这一分形维数来描述复杂的地理事物, 显然是不够的, 因此, 就产生了扩大分维研究的必要性。我国

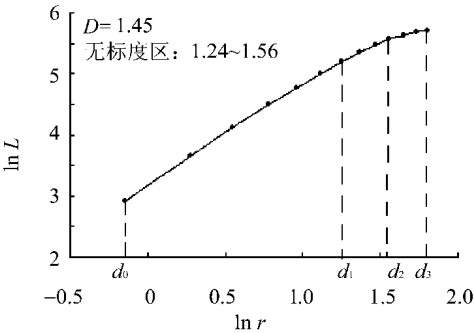


图 3 长度分维特征指标

Fig 3 Length dimension character index

学者母河海、王桥在制图综合方面做过相应的研究。

一般地, 研究客体的自相似性往往是分段保持的, 采集的信息在双对数图上可分成 3 段, 相应于第 1 段 (区间 $[d_0, d_1]$ 对应的部分) 的分维称为织构分维 (textural fractal)^[9], 描述客体的精细结构和纹理特征, 相应于第 2 段 ($[d_1, d_2]$ 对应的部分) 的分维称为结构分维 (structural fractal), 描述客体严格的自相似性特征, 第 3 段 ($[d_2, d_3]$ 对应的部分) 分维为态势分维 (state fractal), 描述客体的总的变化趋势。

对于武汉市交通网络特征, 计算其 3 段分维数, 分别为 $D_{L1} = 1.64, D_{L2} = 1.45, D_{L3} = 0.702$ 。利用采集的全部数据, 充分反映随回转半径增大, 交通网络密度下降的动态变化过程。在区间 $(-0.146 \sim 1.24)$ (map unit, 下文简写 mu) 长度维数为 1.64, 表明此区间交通网络密度较高, 下降速度较慢; 在区间 $(1.24 \sim 1.56)$ (mu) 长度维数为 1.45, 此区间网络密度下降且下降速度加快; 在区间 $(1.56 \sim 1.81)$ (mu) 维数为 0.702, 表明网络密度的变化态势, 这一区域超出主城区的边缘, 交通网络密度自然会迅速降低。这与实际情况相符。

2.3 分枝维数及连通性

城市路网的连通情况是描述交通网络特征的重要指标之一。通常采用连结度指数 $J = \sum m_i / n$ (其中 m_i 为第 i 节点所邻接的边数, n 路网总的节点数) 来描述交通网络总的连通情况, 这是一静态指标, 不能反映网络的动态变化过程。这里利于半径分析法引入分枝维数来描述交通网络连通程度的动态变化过程。

仍然以交通网络中心为圆心, 以 r_i 为回转半径, 统计各圆形区域内的交通网络分枝数 $N(r_i)$, 则:

$$N(r) = \sum_{k=1}^r N(k)$$

显然, $N(r)$ 为各环带分枝累计数, 存在关系:

$$N(r) \propto r^{D_b}$$

(8) 式可表达为:

$$N(r) = ar^{D_b}$$

(9) 式, a 为常系数, 可以证明 D_b 在一定的回转半径范围内具有自相似性并且取值范围应为 $1 \leq D_b \leq 2$ 。回归拟合后, 分枝维数:

$$D_b = \frac{\sum_{i=1}^n \ln r_i \cdot \ln N_{r_i} - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \ln r_i \right) \left(\sum_{i=1}^n \ln N_{r_i} \right)}{\sum_{i=1}^n (\ln r_i)^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \ln r_i \right)^2}$$

(10)

道路的交叉产生分枝在城市交通网络中非常频繁, 而分枝维数是由分枝数目的变化率确定的, 因此可描述城市交通网络的连通情况及其空间结构的复杂程度。维数越高, 表明道路的结构越复杂, 网络在城市中的覆盖面较大, 连通指数较高。反之, 则路网结构简单, 网络在城市中的覆盖面较小, 连通指数较低。

仍以武汉市为例, 以网络中心为圆心, 以等间隔递增长度为回转半径 r_i ($i = 1, 2 \cdots n$), 计算每个半径范围内交通网络的分枝数 $N(r)$, 采集 14 对数据并绘制在双对数坐标系中 (见图 4)。

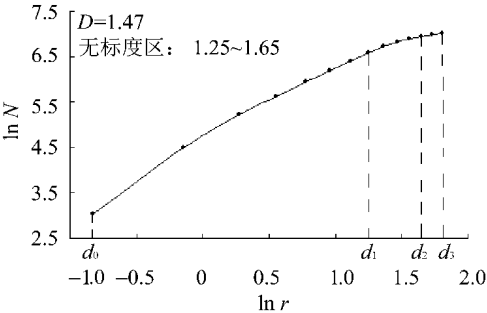


图 4 分枝维数特征指标

Fig 4 Ramification dimension character index

利用图 4, 对分枝维数进行扩充分析。计算无标度区以外的参考维数, 结果分别为: $D_{b1} = 1.674, D_{b2} = 1.47, D_{b3} = 0.452$ 。从严格意义上分析, 武汉市的分枝维数 D_b 为 1.47, 说明武汉市的交通网络结构较为复杂, 连通性一般 (当 $D = 1$ 时, 各交通线互不相连, $D = 2$ 时, 交通网处处连通), 在区间 $(1.248 \sim 1.648)$ (mu) 上具有自相似性; 在区间 $(-0.83 \sim 1.248)$ (mu) 分枝维数为 1.674, 这个区间反映了交通网络复杂程度的精细结构, 说明网络结构复杂, 连通性较高; 而在区间 $(1.648 \sim 1.805)$ (mu)

分枝维数为0.452,它只反映交通网络复杂程度的态势,表明随着回转半径的增大,交通网络的复杂程度迅速降低,连通性也越来越差。

3 讨 论

城市交通网络的定量研究是城市空间形态可控因子量化研究的重要组成部分。通过上面的分析及应用,可以得出:

(1) 城市交通网络的拓扑等级可作为衡量城市规模与空间形态的指标。城市的规模越大,交通网络的骨架越成熟,空间形态越紧凑,其拓扑等级越高;反之,城市规模越小,或城市空间形态呈狭长型,则网络的拓扑等级越低。

(2) 半径分析是局部分析方法,对研究客体信息的获取过程是从局部到整体,具有一定的局限性。充分利用采集的信息,对无标度区以外的观测数据给予新的理解,使得扩展分维赋予新的活力,这不仅弥补了半径分析法的不足,而且有利于从多层次描述交通网络的复杂程度和动态变化过程。

(3) 分形分维引入 GIS,可以定量描述许多非线性不规则的地理实体,二者的结合,不仅大大提高了分维估值的计算精度,而且也是对 GIS 空间属性的拓展。

参考文献:

[1] 杨吾扬,梁进社. 高等经济地理[M] . 北京: 北京大学

出版社, 1997.

[2] 武进. 中国城市形态: 结构、特征及其演变[M] . 南京: 江苏科学技术出版社, 1990.

[3] 王伟, 徐志谦, 杨涛, 等. 城市交通规划理论及其应用[M] . 南京: 东南大学出版社, 1998.

[4] 陈彦光, 刘继生. 区域交通网络分形的 DBM 特征[J] . 地理科学, 1999, (2): 114— 118.

[5] A Stewart Fortheringham, Michael Wegener, Spatial Models and GIS[M] . Taylor & Francis USA, 2000.

[6] 母河海. 基于扩展分形的地图信息自动综合研究[J] . 地理科学进展, 2001(增刊): 14— 27.

[7] 王桥, 母河海. 地图信息的分形描述与自动综合研究[M] . 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1998.

[8] 刘和平. 分形哲学[J] . 河北师范大学学报, 1994(3): 13— 22.

[9] 王家耀. 空间信息系统原理[M] . 北京: 科学出版社, 2001.

[10] 陈述彭, 鲁学军, 周成虎. 地理信息系统导论[M] . 北京: 科学出版社, 1999.

[11] LUCIEN B, DANIEL C, MARIA M et al. When and where is a city fractal? [J] . Environment and Planning B: Planning and Design, 2000, 27: 507— 519.

[12] BENGUIGUI L, DAOUD M. Is the suburban railway system a fractal? [J] . Geographical Analysis, 1991, 23: 262— 368.

[13] LEE J, WONG D W S. Statistical analysis with ArcView GIS [M] . New York: John Wiley & Sons, 2001.

The Structure Characteristic Research of
Urban Traffic Network Based on Spatial Analysis

DUAN Jie¹, LI Jiang²

- (1. Center for Urban and Reginal Studies, Sun Yat sen (Zhongshan) University, Guangzhou 510275, China;
2. The School of Resource and Environment, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: City traffic network is a basic framework of an urban spatial form, and the quantative study of the traffic network is the important aspect of the controllable parameters of an urban spatial form. By using topology analysis with GIS software, the whole hierarchy and complexity of traffic network could be determined, and the basic form of an urban traffic network could be further analyzed, with the length radius dimension describing the change of network density and the ramification radius dimension describing the complexity and accessibility of urban network structure. It is propitious to understand the dynamic changing process of traffic network. Using expanding dimension to analyze an urban traffic network, topology analysis, length radius dimension and ramification radius dimension could be regarded as reference factor of quantitative describing urban traffic network structure.

Key words: spatial analysis; urban traffic network; structure characteristic; fractal