

南京市交通网络的分形特征

柏春广, 蔡先华

(东南大学交通学院, 南京 210096)

摘要: 以分形理论为基础, 借助于地理信息系统软件, 对南京市区交通网络进行了长度-半径维数和分枝维数的测算, 结果表明南京市区的交通网络具有分形特征, 长度-半径维数为 1.574, 而分枝维数为 1.3934, 两者之间存在一定差异。通过进一步对主城区各行政区交通网络的盒子维数的测算, 揭示出各行政区的交通网络也具有分形特征, 分维值介于 1.3568 与 1.4991 之间, 其大小与经济发展状况并没有很好的对应关系。如何以经济状况为基础数据指导城市各行政区的交通发展, 以及两者之间是否在其他区域尺度上存在相关关系等, 仍是需要有更多研究基础才能深入探讨的问题。

关键词: 分形; 分维; 交通网络

文章编号: 1000-0585(2008)06-1419-08

1 引言

分形理论自产生以来即已成为描述复杂现象空间分布的有力工具^[1], 交通网络的结构与城市的演化和区域的发展是一种空间的互动过程, 因此利用分形理论来探讨交通网络分布的复杂性具有重要的现实意义。

目前这一领域的研究相对集中于区域交通网络分形特征的分析^[2~6], 而对于城市交通网络, 尽管也有一些相关方法^[7~10]及具体城市的研究, 如德国斯图加特市郊区的铁路网络^[11]、法国的巴黎^[12]、韩国首尔(汉城)的公共交通系统^[13]、美国达拉斯-福特沃斯地区的交通网络^[14]以及我国上海^[15, 16]、武汉^[17]、大连^[18]等少数几个城市的交通网络分形现象的揭示, 然而现有的关于特定城市分形的研究系统性相对缺乏, 对于城市交通网络分形机制而言, 该方面的研究仍需加强。本研究借助于 ArcGIS 软件对南京市区及主城区的几个行政区交通网络的分形性质作了揭示, 展示了其整体及局部的分形特征, 以期在城市交通网络的分形研究积累基础数据。

2 南京市区交通网络的长度-半径维数

2.1 研究方法与数据来源

长度-半径维数是在交通网络长度 $L(r)$ 与研究区域半径 r 之间存在幂指数函数关系的基础上经计算获得的^[19, 20]。

一般来说, 设长度为 L , 面积为 S , 体积为 V , 则有:

$$L^{1/1} \propto S^{1/2} \propto V^{1/3} \quad (1)$$

收稿日期: 2008-03-06; 修订日期: 2008-07-14

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2006CB705501), 东南大学国家自然科学基金预研项目(XJ0621247)

作者简介: 柏春广(1971-), 男, 江苏盐城人, 博士, 讲师。主要从事自然地理及分形方面的研究工作。

E-mail: baichg@seu.edu.cn

若具有某种测度的量为 M ，上式即可广义化形式为：

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

如果一个面积为 S 的区域内的交通网络具有分形特征，则根据式 (2)，交通网络的总长 $L(S)$ 与区域面积之间应有以下关系：

$$L(S)^{1/D} \propto S^{1/2} \tag{3}$$

当区域取圆形时，因 $S \propto r^2$ ，式 (3) 可化为

$$L(r) = L_1 r^{D_L} \tag{4}$$

式中的 r 为回转半径， $L(r)$ 指半径为 r 的区域范围内的网络总长度， L_1 为常数， D_L 为分维，即所指的长度-半径维数。

在对南京市区交通网络分形特征进行分析时，以该市的交通枢纽新街口为测算中心，选取半径 r ， r 的取值范围为 1~ 9km (见图 1)，量算半径范围内即 πr^2 面积中交通网络总长度 $L(r)$ ；改变 r ，可得不同的 $L(r)$ ，将点列 $[r, L(r)]$ 标绘在双对数坐标图上，观察点列是否呈对数线性分布，即考察区域内交通网络密度是否具有分形性质。若点列呈对数线性分布，则拟合直线的斜率即为交通网络的分维值。



图 1 南京市区交通网络与回转半径

Fig 1 The transportation network of Nanjing city and radial distances

2 2 结果分析

根据上述方法所测得的具体结果见表 1 和图 2。

由图 2 可以看出，南京市区的交通网络在以新街口为中心的 1~ 9km 的半径范围内，其总长度与半径呈明显的对数线性关系，相关系数平方 R^2 为 0. 9894，能够通过显著性水平 $\alpha= 0. 05$ 下的检验。即南京市区的交通网络长度分布具有基本的分形性质，其分维值

为 1.574。

表 1 南京市区交通网络的道路总长 $L(r)$ 和分枝数 $N(r)$

Tab 1 The number of branches and the total length of the transportation network of Nanjing city									
半径 (km)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
道路总长 (km)	34 70	134 43	270 80	422 95	559. 80	717. 76	870 48	1019 75	1147. 73
分枝数	258	938	1833	2746	3386	4082	4728	5337	5820

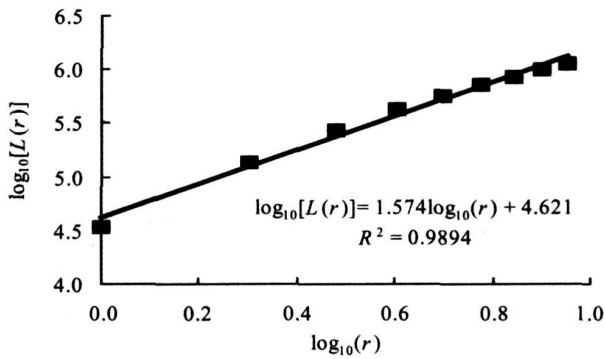


图 2 南京市区交通网络长度-半径双对数

Fig. 2 The $\ln-\ln$ plot on the length and radial distance of the transportation network

3 南京市区交通网络的分枝维数

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，由交通网络的分枝数目变化率所确定的分枝维数能揭示交通网络的纵横交叉特征及其复杂的空间变化。与长度-半径维数类似，分枝维数的确定也是利用回转半径法，由下式定义：

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

(5)

这里

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

(6)

式中的 r 为回转半径，改变 r ，可将区域划分成若干等宽的同心环带，环带以 k 编号， $n(k)$ 为第 k 个同心环带中的交通网络分枝数目。取 $r = 1, 2, \dots$ ，则 $k = 1, 2, \dots, r$ ，可见 r 规定了 k 的取值上限， $N(r)$ 为 πr^2 范围内各环带的分枝累积数。式(5)中的系数若用 N_1 表示，则有 $N(r) = N_1 r^{D_b}$ ，称 D_b 为分枝维数^[21]。分维值越高，表示从测算中心向周围地域随着半径的增大，网络分叉总数增加越快，即道路的结构复杂，连通指数较高；反之则反映网络分叉总数增加相对较慢，道路的结构简单，连通指数较低。当 $D_b = 1$ 时，各交通线互不相连。

在对南京市交通网络进行分枝维数的测算时，测算中心和回转半径的选取与长度-半径维数相同，测算的结果见图 3。

图 3 中的南京市区交通网络的分枝数与半径呈对数线性相关，即在以新街口为中心，1~ 9km 的半径范围内的交通网络分枝的分布具有分形的性质，分枝维数为 1.3934，所对应的相关系数平方 R^2 为 0.9763，能够通过显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下的检验。

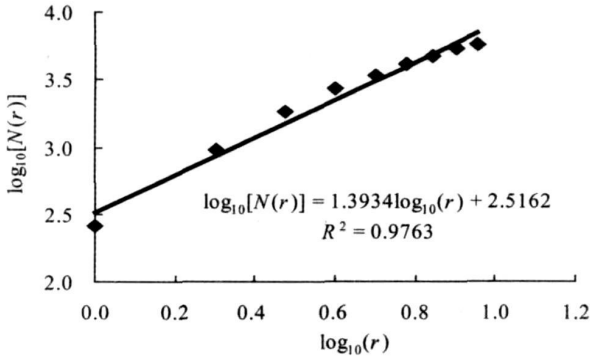


图 3 南京市区交通网络分枝数-半径双对数

Fig 3 The $\lg-\lg$ plot on the number of branches and radial distance of the transportation network

4 南京市主城区交通网络分形特征的空间差异

在获悉南京市交通网络分布总体具有分形性质的基础上，本研究进一步探讨了主城区及各行政区交通网络这一性质的差异。由于对各行政区来说，无法选取合适的中心点进行长度维数和分枝维数的分析，因此这里采用了盒子维数算法，具体为：

用间隔为 R 的格子把平面分割成边长为 R 的正方形网格（即粗略化网格），计算有交通网络落入的正方形格子的数目，并记为 $N(R)$ ，当使 R 有变化时， $N(R)$ 亦随之而变。在 $N(R)-R$ 的双对数关系图上，标绘出数据点，考察数据点是否呈直线分布，若为直线分布，则可用一元线性回归法拟合出一条直线：

$$\lg N(R) = A - D \lg R$$

式中： D 值实际上就是上述对数坐标系中直线斜率的大小， D 值越大，则 $N(R)$ 增加得越快， D 值即为研究对象的分维值。

运用 ArcGIS 软件，对南京主城区的鼓楼、玄武、白下、秦淮、建邺、下关区的交通网络进行了盒子维数的测算，具体的 $N(R)$ 如表 2 所示，获得的分维值见图 4。其中整个南京主城区的 $N(R)$ 值是由 6 个行政区的 $N(R)$ 求和所得。

表 2 南京主城区各行政区的交通网络的 R 、 $N(R)$

Tab 2 The value of R and $N(R)$ of transportation network in each district of the main city of Nanjing

R (m)	N(R)						南京主城区
	鼓楼	玄武	白下	秦淮	建邺	下关	
50	3914	5516	2848	3070	2945	3509	21802
100	1709	2504	1250	1277	1266	1485	9491
150	985	1496	730	721	711	834	5477
200	634	994	480	478	474	532	3592
250	434	725	338	344	330	370	2541
300	325	554	259	253	258	273	1922
350	247	439	204	204	198	209	1501
400	204	351	171	166	159	169	1220
450	164	306	133	136	133	138	1010
500	130	249	114	114	111	122	840

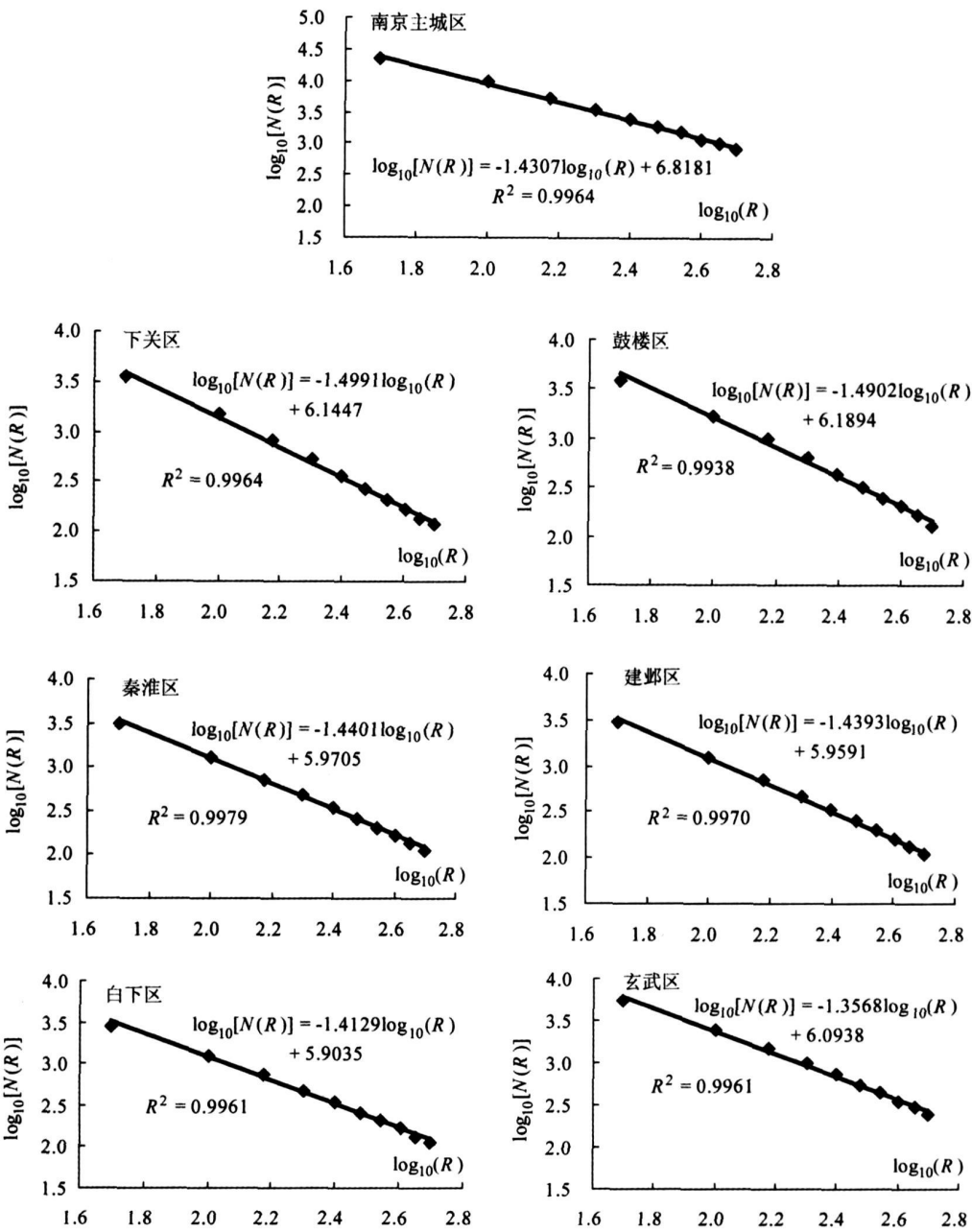


图4 南京市主城区各行政区交通网络的 $N(R)$ 、 R 对数关系

Fig 4 The $\ln-\ln$ plot of $N(R)$ and R of the transportation network of the districts of the main city of Nanjing

由图4可以看出，在50~500m的区间范围内，南京市主城区及各行政区交通网络的 R 、 $N(R)$ 在双对数图上表现出很好的相关性，相关系数平方 R^2 均在0.99以上，即交通网络的分布具有明显的分形性质，整个南京主城区为的分维值为1.4307，各行政区以下关区最大，为1.4991，其后依次为鼓楼区(1.4902)、秦淮区(1.4401)、建邺区(1.4393)、白下

区(1.4129),最小的是玄武区,为1.3568。需要说明的是,在分维值的具体测算过程中,较易发现由于玄武湖、紫金山等自然障碍的存在,使玄武区交通网络的分布受到了明显限制,势必造成该区的分维值相对较低。

为进一步探讨各行政区交通网络分维值的大小与经济发展状况之间的关系,以《南京市统计年鉴》所公布的经济数据为数据源,采用了与交通数据年份相对应的2005年的资料,计算了各区的人均生产总值及单位面积生产总值,将其作为经济指标与交通网络分维值的差异进行了对比,具体见表3和图5。

表3 南京主城区各行政区交通网络的盒子分维与经济状况

Tab 3 The value of box dimension of transportation network and the economic condition in esch district of the main city of Nanjing

行政区	下关	鼓楼	秦淮	建邺	白下	玄武
分维值 D	1.4991	1.4902	1.4401	1.4393	1.4129	1.3568
相关系数 R^2	0.9964	0.9938	0.9979	0.9970	0.9961	0.9961
人均生产总值(万元/人)	2.9630	3.0400	2.1076	2.3071	4.2177	3.4930
单位面积生产总值(亿元/ km^2)	3.1106	8.4021	2.2702	0.5462	7.4312	2.2114

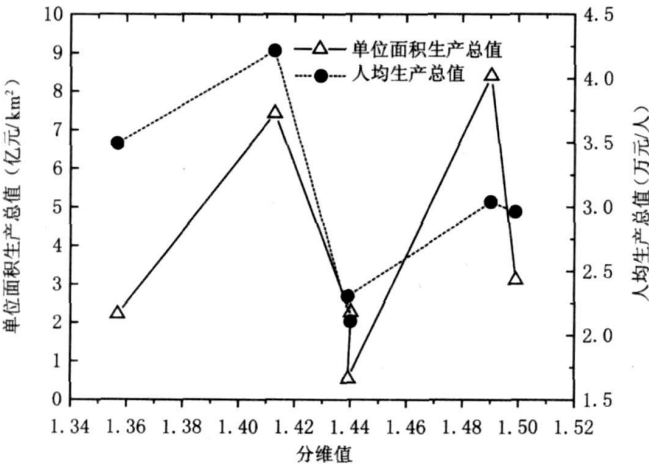


图5 南京主城区交通网络分维值与经济关系

Fig 5 The relationship between Hausdarf fractal dimension of transportation network and economic condition in each district of the main city of Nanjing

表3和图5显示出南京市主城区各行政区的交通网络分维值无论是与人均生产总值还是与单位面积生产总值之间都没有很好的对应关系,经济指标相对较高的白下区的交通网络分维值并不大,经济指标相对较低的下关区却有着较大的交通网络分维值。

5 结论与讨论

长度-半径维数及分枝维数的测算都显示整个南京市区的交通网络在以新街口为中心的1~9km的半径范围内具有分形特征,即总体体现了南京市的交通网络分布从新街口向四周由密到疏的分布状况。然而两者在数值上却存在明显的差异,前者达1.574,而后者仅为1.3934,这一数值差异既体现了两者含义的不同,即网络长度与具体的连通状况之间的差别,同时也在一定程度上反映了南京市的交通网络在连通性上相对具有更大的发展

空间。当然, 若要对南京市交通网络的分形特征的发育程度给予评价, 则需不同时期的长度-半径维数及分枝维数的测算结果, 否则难以给出有意义的结论。

尽管南京主城区各行政区交通网络的分布符合盒子分形的规律, 但分维值则存在明显差异, 并且其大小并不与经济状况呈现很好的对应关系, 无论是采用人均生产总值还是单位面积生产总值作为经济指标均是如此。表明除城市内部交通网络的分布外, 还有许多其他因素影响城市经济的发展, 如何以经济发展状况指导各行政区的交通发展仍是一个值得探究的问题。两者之间的不相关性存在于何种尺度, 以及是否在某种尺度的区域空间两者之间会存在某种相关性等问题, 需要在更多相关研究的基础上才能做深入的讨论。

在进行交通网络分维值的测算时, 由于并未对道路的等级进行区分, 因此数值本身只具有相对的意义。如何考虑对不同等级的道路给予合理的权重, 以使今后的交通网络分形研究所得结果更加符合客观交通状况, 并且具有更强的可比性, 是一个有意义的研究课题。

参考文献:

- [1] Mandelbrot B B, Wheeler J A. The fractal geometry of nature. *American Journal of Physics*, 1983, 51(3): 286 ~ 287.
- [2] 陈彦光, 刘继生. 区域交通网络分形的 DBM 特征——交通网络 Laplacian 分形性质的实证研究. *地理科学*, 1999, 19(2): 114~ 118.
- [3] 徐军, 罗嵩龄. 公路网连通性研究. *中国公路学报*, 2000, 13(1): 95~ 97.
- [4] 苏伟忠, 杨桂山, 甄峰. 基于无尺度结构的苏南乡镇公路网分析. *地理研究*, 2007, 26(5): 1005~ 1012.
- [5] Benguigui L, Daoud M. Is the suburban rail system a fractal? *Geographical Analysis*, 1991, 23(4): 362~ 368.
- [6] Benguigui L. The fractal dimension of some railway networks. *Journal de Physique*, 1992, (2): 385~ 388.
- [7] 周江评, 崔功豪, 张京祥, 等. 城镇交通网络信息图谱研究刍议. *地理研究*, 2001, 20(4): 397~ 406.
- [8] 王秋平, 张琦, 刘茂. 基于分形方法的城市路网交通形态分析. *城市问题*, 2007, (6): 52~ 55.
- [9] 孙壮志. 城市交通网络形态特征分形计量研究. *交通运输系统工程与信息*, 2007, 7(1): 29~ 38.
- [10] Dendrinos D S, El Naschie M S (eds.). *Nonlinear dynamics in urban and transportation analysis. Chaos, Soliton & Fractals (Special Issue)*, 1994, 4: 497~ 617.
- [11] Frankhauser P. Aspects fractals des structures urbaines. *L' Espace G ographique*, 1990, 19(1): 45~ 69.
- [12] Benguigui L. A fractal analysis of the public transportation system of Paris. *Environment and Planning A*, 1995, 27(7): 1147~ 1161.
- [13] Kim K S, Benguigui L, Marinovc M. The fractal structure of Seoul's public transportation system. *Cities*, 2003, 20(1): 31~ 39.
- [14] Lu Y, Tang J. Fractal dimension of a transportation network and its relationship with urban growth: A study of the Dallas-Fort Worth area. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2004, 31: 895~ 911.
- [15] 黄佩蓓, 刘妙龙. 基于 GIS 的城市交通网络分形特征研究. *同济大学学报(自然科学版)*, 2002, 30(11): 1370 ~ 1374.
- [16] 刘妙龙, 黄蓓蓓. 上海大都市交通网络分形的时空特征演变研究. *地理科学*, 2004, 24(2): 144~ 149.
- [17] 段杰, 李江. 基于空间分析的城市交通网络结构特征研究. *中山大学学报(自然科学版)*, 2002, 41(6): 105 ~ 108.
- [18] 郭建科, 韩增林, 许妍. 基于集聚分形的大连城市交通网络演变研究. *交通运输系统工程与信息*, 2007, 7(5): 121~ 126.
- [19] 陈彦光, 罗静. 河南省城市交通网络的分形特征. *信阳师范学院学报(自然科学版)*, 1998, 11(2): 172~ 177.
- [20] 刘继生, 陈彦光. 交通网络空间结构的分形维数及其测算方法探讨. *地理学报*, 1999, 54(5): 471~ 478.
- [21] 陈彦光. 一种交通网络的分形维数及其测算方法. *信阳师范学院学报(自然科学版)*, 1999, 12(4): 426~ 429, 434.

Fractal characteristics of transportation network of Nanjing city

BAI Chun-guang, CAI Xian-hua

(College of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: It is very important to research the fractal characteristics of the distribution of transportation network. At present the researches in this field mainly focus on the regional road network and have not attached enough importance to the urban transportation network. There are several different calculation methods of fractal dimension value. Length-radius dimension and dendrite-radius dimension of transportation network of Nanjing city are calculated with the help of the software ArcGis in this paper. Xinjiekou, the transportation hinge of Nanjing city is chosen as the calculation center for fractal characteristics analysis, and the radius value changes between 1 to 9km. The results show that the transportation network of the city has fractal characteristics. The value of length-radius dimension is 1.574. The fractal dimension value of dendrite-radius is 1.3934. It shows that the connectivity of the road of Nanjing city should be strengthened. The box dimension of different districts of the main city has also been calculated at the scale of 50 to 500m in this research and the results show that the value is between 1.3568 and 1.4991. The respective value of each district is 1.4991 (Xiaguan), 1.4902 (Gulou), 1.4401 (Qinhuai), 1.4393 (Jianye), 1.4129 (Baixia) and 1.3568 (Xuanwu). The fractal dimension of transportation network of these districts does not have very good relationship with economic index. It can be concluded that besides urban transportation network, there are many other factors that influence the economic development of the districts, such as the existence of water region and upland, which influence the road construction. How to plan the transportation network of the districts with the present economic condition is still a difficult problem. It has also been brought forward that the accuracy of the fractal dimension value is relative because the order of the road has not been considered. How to assign the weight value to the roads with different orders is very important for future research. There is still no answer to the questions such as in which scale the fractal dimension of the transportation network does not have good relationship with regional economy index, and whether they have good relationship in other regional scale. More researches should be done to get the answer to the relative questions.

Key words: fractal; fractal dimension; transportation network