

武汉城市圈城乡道路网分形的时空结构

刘承良^{1, 2, 3}, 余瑞林⁴, 段德忠⁴

(1. 华东师范大学城市与区域科学学院, 上海 200062; 2. 华东师范大学科技创新与发展战略研究中心, 上海 200062; 3. 地理过程分析与模拟湖北省重点实验室(华中师范大学), 武汉 430079; 4. 华中师范大学城市与环境科学学院, 武汉 430079)

摘要: 构建加权长度-半径分维模型, 基于武汉城市圈城乡道路网空间数据, 运用GIS空间分析方法, 探讨武汉城市圈城乡道路网的密度分形特征及其时空演化规律。武汉城市圈城乡道路网不同程度表现出分形性即具有结构自相似性; 不同等级路网的密度分维值普遍遵循距离衰减规律, 路网具备较大的扩展潜力; 高等级路网发育相对迟缓, 由中心向边缘的密度衰减较快, 且在分布形态上围绕圈域核心武汉市呈强凝聚态展布; 低等级道路则相对发育成熟, 分布均匀, 覆盖效果较好; 不同等级路网的普通和加权长度-半径维数均表现为圈层式结构, 遵循中心-外围的距离衰减律; 不同时段城乡道路网的分维值不断上升, 路网结构渐趋优化, 且存在明显的双标度区的双分形结构。

关键词: 加权分形; 时空结构; 城乡道路网; 武汉城市圈

DOI: 10.11821/dlyj201404016

1 引言

分形理论是20世纪70年代中期由法裔美国数学家Mandelbrot建立的一种新几何学^[1]。因其在研究复杂不规则实体方面的优越性, 在自然科学和社会科学诸多方面已经得到了广泛应用。交通网络空间结构与分布形态的不规则性, 使得其成为国内外分形应用研究领域的一个重要方面。国外分形交通网络研究始于20世纪80年代。Thibault等在研究城市空间形态时采用分形方法对法国里昂市的公共交通路网、郊区铁路网以及给排水管网设施进行了系统的测算, 揭示了道路等级数量 $N(L)$ 与各等级的长度 L 之间的双曲线函数关系^[2]; 不久, Frankhouser研究了德国斯图加特郊区的铁路网络, 发现以交通枢纽为中心作回转半径 r , 半径范围内的铁路网络长度 $L(r)$ 与半径 r 之间具有幂指数关系^[3]; 同时, Benguigui等研究了巴黎郊区的铁路系统, 发现铁路网络显示枝状分形结构特征^[4]。

国内交通网络的分形研究也在20世纪90年代末期开始活跃^[5]。在研究内容上, 主要借鉴国外分形理论, 对主要城市(上海^[6]、武汉^[7]、南京^[8]、大连^[9]等)、区域(中国^[10]、广东^[11]、河南^[12]、辽宁^[13]等)的公路网络、铁路网络和航空网络等开展实证研究, 揭示中国城市及区域交通网络空间形态的自相似性、无标度性和动态性特征^[14]; 在研究尺度上, 以

收稿日期: 2013-06-20; 修订日期: 2013-12-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41201130, 41101361); 国家社会科学基金项目(11CJL048); 华中师范大学中央高校自主科研经费(CCNU13A05003)

作者简介: 刘承良(1979-), 男, 汉族, 湖北武汉人, 博士, 副教授, 主要从事关系经济地理的复杂性研究。

E-mail: chenglianglew@163.com

城市内部和行政区域为主；在研究方法上，主要是构造拓扑网络模型，运用粗细化分割和逐步分形递归^[15]，多借鉴国外成熟分维模型：容量维数、覆盖维数、阻抗维数等^[16]。部分学者创造性构造了的分枝维数^[17]、相似维数^[18]等分形模型，认为长度-半径维数、分枝维数和空间关联维数是较好反映城市交通网络分形特征的三种基本分维。

综上所述，在已有的分形交通网络研究中，主要是以单个城市为研究对象，对于像城市圈或是城市体系的大尺度交通网络分析研究相对较少；同时，对不同的道路等级差异对分形结果产生的影响考虑不足。因此，本文以武汉城市圈城乡道路网容量为研究视角，对不同等级的道路网容量分形进行多尺度分析，揭示城市圈道路网分形特征，为一般性的城市圈道路容量比较分析提供理论支持。

2 研究方法 with 数据来源

2.1 研究模型

(1) 加权长度-半径维数。假设武汉城市圈城乡道路网的分布密度呈现出由测算中心向周边地区的凝聚态展布格局，则可借助分形几何学测度确定半径 r 范围内道路网总长度 $L(r)$ 与半径的关系^[5,12]：

$$L(r) = L_1 r^{D_L} \quad (1)$$

式中： r 为圆半径； $L(r)$ 为半径为 r 的地域范围内道路网总长度； L_1 为常数； D_L 为分维。

由于现实城乡道路网存在道路等级差别（高速、国道、省道、县道和乡村公路），不同类型对城乡道路网的贡献不同，则应赋予不同的权重，设其权重依次为 $P_0(r), P_1(r), \dots, P_i(r), \dots, P_n(r)$ ；另外在半径 r 的区域内，不同类型的道路长度也不同，设不同种类型的道路长度分别为 $L_0(r), L_1(r), \dots, L_i(r), \dots, L_n(r)$ 。则半径为 r 的区域内，加权城乡道路网总长度为 $L_w(r) = P(r) \times L(r)$ 。因此，(1) 式可变换为：

$$L_w(r) = P(r) \times L(r) = L_1 r^{D_{wL}} \quad (2)$$

式中： r 为区域半径； $L_w(r)$ 为半径为 r 的区域范围内的加权道路网总长度； L_1 为常数；幂指数 D_{wL} 即为加权长度-半径维数（Weighted Radial Dimension）。

(2) D_{wL} 的交通意义。对式 (2) 求导变换，可得道路交通网络分布密度的空间衰减公式为：

$$\rho(r) \propto r^{D_{wL} - d} \quad (3)$$

这里， $d=2$ 为欧氏维数。 D_{wL} 值的大小，表明交通网络分布密度由中心向周边的变化情况，即网络交通饱和和变化情况。当 $D_{wL} < 2$ 时，交通网络密度与复杂度从测算中心向周边递减，此时交通网络尚未饱和；当 $D_{wL} = 2$ 时，交通网络密度与复杂度从测算中心向周边均匀变化，交通网络基本饱和；当 $D_{wL} > 2$ 时，交通网络密度与复杂度从测算中心向周边递增。显然，若测算中心为交通枢纽，这种 $D_{wL} > 2$ 维数是不正常的；但测算区域内若存在多个交通枢纽，这种情况是可能存在的。

2.2 数据处理

借用 SPSS 17.0 和 MATLAB 7.0 分别采用层次分析法和熵值赋权法（具体计算步骤见参考文献[19]），以避免主观因素带来的偏差，获得国道、省道和县道权重，计算城市圈道路线路加权长度汇总数据；基于 1989-2010 年武汉城市圈城乡道路网空间数据库，通过 ArcGIS 9.3 软件作缓冲分析，不断调整回转半径（以 10 km 基准，10 km 为间隔，分形递

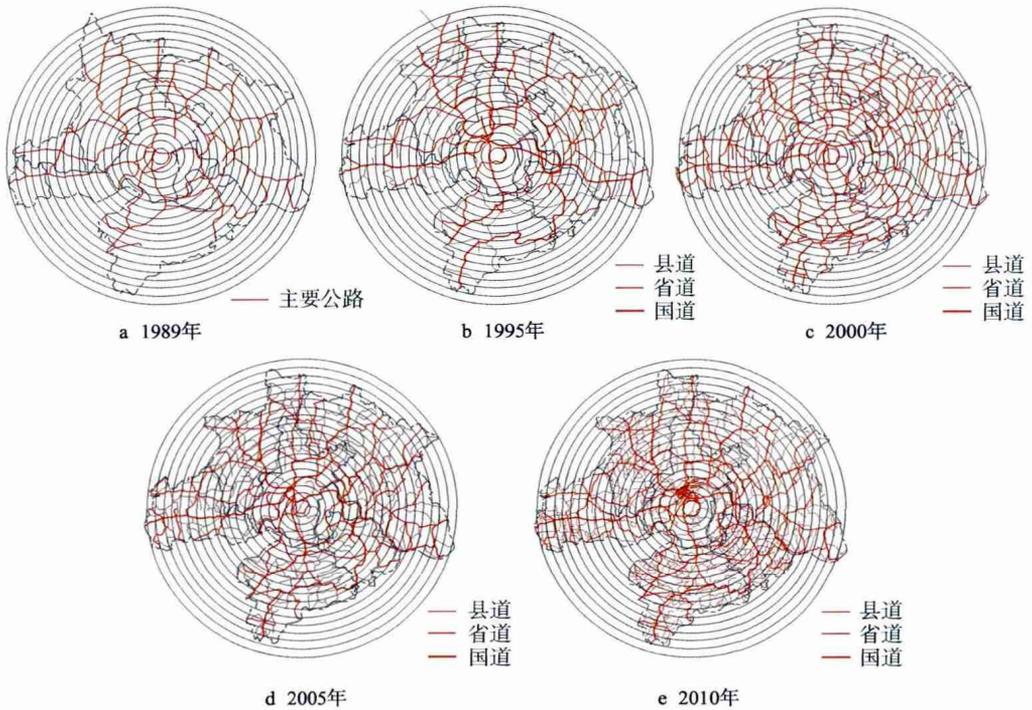


图1 1989-2010年武汉城市圈城乡路网与回转半径

Fig. 1 Urban-rural road network (URRN) and the radial distances of Wuhan Metropolitan Area (WMA) from 1989 to 2010

归获取不同空间序列单元,相应提取各半径圆内不同等级城乡道路(国道、省道和县道)的累计长度值(图1),计算普通分维值和加权分维值。

3 不同等级的城乡道路网密度分形比较

3.1 普遍遵循距离衰减规律,具有较大扩展潜力

所有等级道路点列呈对数线性分布,存在无标度区,表明城乡道路网中心-外围密度变化具分形特征,且形态十分良好(曲线拟合度均超过0.95)(图2)。整个圈域路网普通长度-半径维数 $D_L < 2$,一方面说明城乡道路网的密度、完善度及复杂度从武汉市向其周边区域呈现出随空间距离的增加而逐渐降低的变化规律,城乡道路网受距离影响不同程度存在空间收敛效应,其基本属性表现出以武汉市为中心的圈层衰减,呈现核心-边缘结构;另一方面,整个圈域大部分类型路网长度-半径分形维数均不超过1,除了省道网和县(乡)道网,远小于交通网络分维平均值1.7,一定程度表明武汉城市圈城乡道路网空间结构不够严谨,网络密度较低,空间形态松散,路网演化不够成熟,尚未达到饱和状态,处于稳步推进态势,路网扩展潜力巨大(表1)。究其原因,主要是整个圈域地貌类型多样,形态复杂,山地、丘陵(岗地)、河流湖泊、平原等纵横交错,使区位条件相差较大,从而导致容量维数整体不高。

3.2 均存在明显标度分叉,拐点位于核心-外围圈交界处

所有等级路网分维曲线不同程度出现分叉现象:国道网在第12环带($r=120\text{ km}$),省

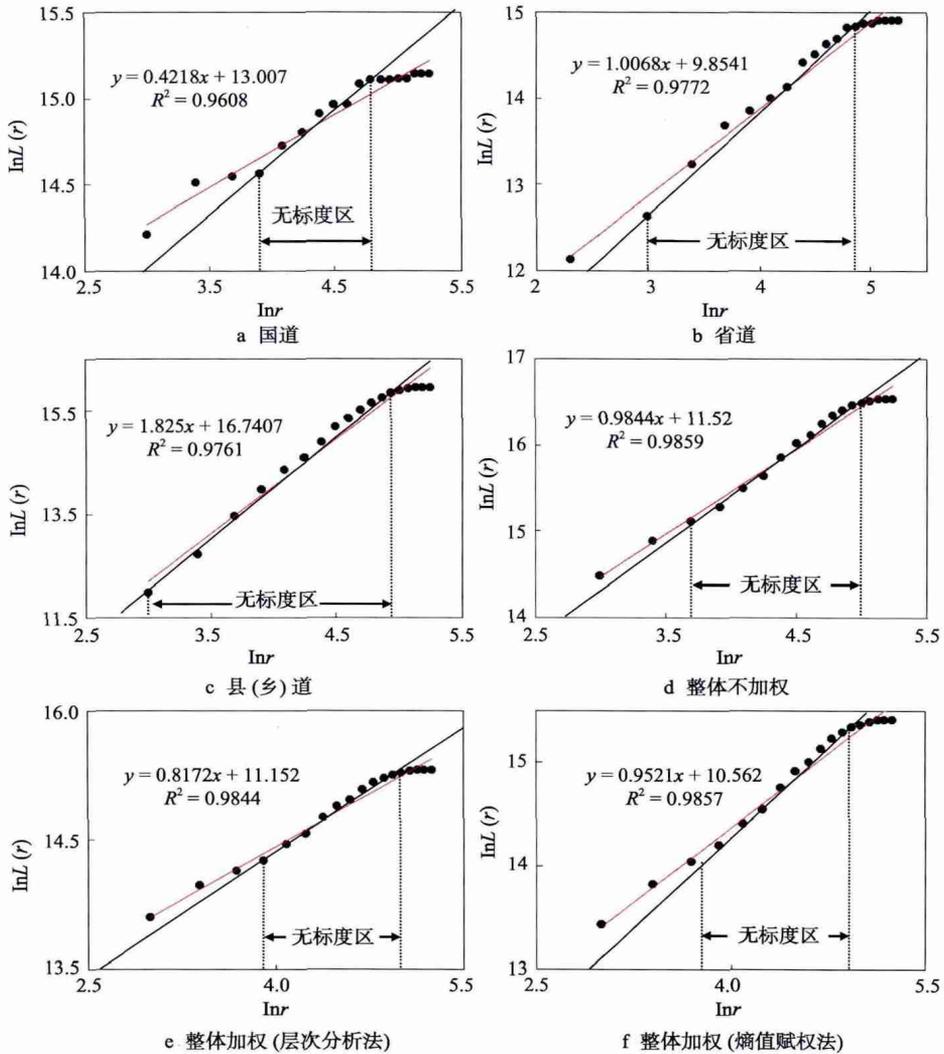


图2 武汉城市圈城乡道路网不同等级道路长度 回转半径双对数坐标图 (2010年)

Fig.2 The ln-ln plots on the lengths of different URRN grades in WMA against radial distances

表1 2010年武汉城市圈城乡道路网的长度 半径维数

Tab. 1 The lengths dimension of the URRN in WMA against radial distances

分形对象	拟合曲线	维数 D_L	相关系数 R^2	无标度域/km	数据处理
国道网络	$y=0.4218x+13.007$	0.687	0.9608	50~110	剔除异值区[0,10]
省道网络	$y=1.0068x+9.854$	1.006	0.9772	20~120	/
县(乡)道网络	$y=1.8250x+6.741$	1.825	0.9761	20~130	剔除异值区[0,10]
普通路网	$y=0.9844x+11.520$	0.984	0.9859	30~140	剔除异值区[0,10]
加权路网(层次分析法)	$y=0.8172x+11.152$	0.817	0.9844	40~140	剔除异值区[0,10]
加权路网(熵值赋权法)	$y=0.9521x+10.562$	0.952	0.9857	40~140	剔除异值区[0,10]

注：层次分析法赋国道、省道和县(乡)道的权重分别为0.45、0.34、0.21；熵值赋权法赋国道、省道和县(乡)道的权重分别为0.3537、0.3379、0.3084。

道网在第13环带($r=130$ km),县(乡)道网则在第14环带出现拐点($r=140$ km)。拐点基本介于120~140 km间(图2),大致位于武汉城市圈核心圈层与外围圈层交界处附近,一定程度表明路网外向扩展趋势明显。同时整个外围圈层路网普遍落入无标度区外,路网分形特征不明显,结构有待发育完善。

3.3 不同等级道路,发育程度和充填能力不一

一般而言,形态分维在 $D=1.7$ 附近最理想,甚至存在理论期望值 1.701 ± 0.02 ^[20],交通网络1.7左右的分维值可能是网络形态成熟的一个判定指标^[14]。

数据显示三个等级道路分维值遵循国道(0.687) < 省道(1.006) < 县(乡)道(1.825)序列(表1),道路等级越高,发育程度和充填能力往往越低。其中,县(乡)道发育成熟,超过理想期望值水平,而省道和国道距离理想值尚有不少差距,高等级路网发育迟缓,充填能力较差,覆盖水平较低。

究其原因,国道和省道网络建设相对较晚,同时线路串连倾向大中城市,尽管改革开放以来迅速发展,但其网络的图形强度、路网密度、交通线路设置、通达性与通达能力仍然落后于县(乡)级公路,表明低等级路网具有成熟的历史延续性。

3.4 不同等级道路,中心-边缘密度衰减不一

分维值大小可以反映出路网自中心向外围密度变化的速度,一般分维值越大,密度衰减变化越缓;当 $D=1$ 时,网络成直线状密度分布,当 $D=2$ 时,网络成平面状密度分布,当 $1 < D < 2$ 时,网络介于直线与平面间的密度分布。

三大等级道路中,国道分维值最小,呈放射状展布,由中心向四周的密度迅速变小,衰减较快,分维值小于1,国道网呈线状密度衰减;省道次之,中心-外围密度变化相对较快,分维值略大于1,整个省道网呈放射网状格局;而县(乡)道分维值最大,达到1.825,基本呈格网状布局,中心-外围密度变化衰减平缓,体现出网状结构较放射结构分布均匀,覆盖效果好的特点(表1)。

3.5 不同等级道路,中心-边缘分布形态不同

同样,半径分维值大小也可以反映出路网自中心向外围的密度分布形态:当 $D=2$ 时,城乡道路网沿武汉向四周均匀分布,越接近2,路网形态分布越均匀;当 $D < 2$ 时,路网沿武汉向外围呈凝聚态分布,具有向心特征;当 $D > 2$ 时,路网中心-边缘形态展布呈离散态,具有离心趋势。

三个大等级的道路中,国道和省道网分维值不超过1.5(表1),高等级路网主要围绕圈域核心-武汉市呈强凝聚态分布,表明武汉市受历史基础、政治地位、经济发展、政策规划等因素共同作用,在路网建设和布局上,尤其是国家宏观公路干线网(高等级路网),具有马太效应,高等级路网通过自组织和他组织作用,形成特有的向核心凝聚态势。

县(乡)道网分维值 D 达到 $1.825 > 1.5$ (表1),主要围绕武汉市中心城区呈弱集聚态分布,实际上相较国道和省道网建设的刚性指令,县(乡)道网建设和布局受政策和规划的影响较弱,多在自然联系基础上发育而成,表现出强自组织性,进而导致整个县(乡)道网发育较均匀,渗透能力更强。同时,经过“十一五”期间的村村通等大规模公路建设,县(乡)道网已经趋于饱和,尤其是核心圈,不宜再进行大规模的建设开发,重点应拓展外围圈空间。

3.6 普通 加权路网局部结构相似，保持类同趋势

研究客体的自相似性往往是分段（局部）保持的，采集的信息在双对数图上可分成三段：第一段区间 $[d_0, d_1]$ 对应部分的分维称为织构分维（Textural fractal），描述路网的精细结构和纹理特征；第二段 $[d_1, d_2]$ 对应部分的分维称为结构分维（Structural fractal），描述路网严格的自相似性特征；第三段 $[d_2, d_3]$ 对应部分的分维为态势分维（State fractal），描述路网总的变化趋势^[15]。

比较全点列城乡道路网 $[\ln L(r), \ln r]$ 曲线变化态势，普通和加权路网均表现出三段分维值分异，三段分维值区间一致：织构分维区间均落入第1~12环带，结构分维区间均为第13~16环带，态势分维为第17~19环带（表2）。

国道、省道和县（乡）道三段分维值基本保持同步下降幅度，即随回转半径增大，城乡道路网保持梯度式密度下降的动态变化过程，明显划分为三大圈层：① 核心密集圈（第1~12环带间， $\ln r=2.3\sim 4.70$ ，此区域基本对应武汉城市圈核心圈层范围），普通和加权长度 半径维数超过1，此区间路网密度相对整体水平较高，中心 外围路网密度下降速度较慢，但与1.7的期望值差距明显，整个路网密度尚未饱和，具有一定上升空间；② 中间稀疏圈（第13~16环带区间， $\ln r=4.78\sim 5.08$ ），长度 半径维数不到0.6，此区间路网并未发育良好的分形形态，网络密度较整体水平小，下降速度较快；③ 外围稀薄圈（第17~19环带区间， $\ln r=5.14\sim 5.25$ ），长度 半径维数不超过0.01，网络密度迅速下降（表2）。

表2 2010年武汉城市圈城乡道路网普通和加权长度 半径维数的精细结构

Tab. 2 Detailed structure of the lengths of non-weighted and weighted road networks in WMA against radial distances

分维	织构分维 D_{t1}	区间范围	结构分维 D_{t2}	区间范围	态势分维 D_{t3}	区间范围
普通	1.101		0.424		0.007	
加权(层次分析法)	1.203	1~11环带($\ln r=2.3\sim 4.70$)	0.538	12~16环带($\ln r=4.78\sim 5.08$)	0.009	17~19环带($\ln r=5.14\sim 5.25$)
加权(熵值赋权法)	1.229		0.563		0.010	

4 不同时间段的城乡道路网分形演化比较

4.1 普通分维值逐步上升，路网结构渐趋优化

1989-2010年间，武汉城市圈城乡道路网全点列基本具有良好的幂律分布，统计自相似性比较明确，整个圈域城乡道路网具有分形性质^[21]：

圈域城乡道路网的分维值渐趋上升，路网发育不断成熟。整个圈域路网分维值由1989年的0.717增加到2010年的1.256，5个年份的路网分维值整体保持上升趋势：0.717（1989年）→1.278（1995年）→1.158（2000年）→1.249（2005年）→1.256（2010年）（表3）。一方面，表明武汉城市圈城乡道路网通过自组织演化，结构渐趋优化，不断进化；另一方面，1995年分维值达到时序列最大值，1995-2000年间，城乡道路网分维值不同程度下降，城乡道路网分形发育出现局部年份的退化。

圈域城乡道路网分形整体性态逐步变好。由表3可知，城乡道路网幂函数方程拟合度 R^2 总体上有渐趋上升态势，分维标准误差 δ 则有不断下降倾向。1989-2010年间，方程拟合

表3 武汉城市圈城乡道路网长度 半径维数的时序变化 (1989-2010年)

Tab. 3 The temporal variation of the lengths dimension of the URRN in WMA against radial distances (1989-2010)

指标	年份				
	1989	1995	2000	2005	2010
分维值 D	0.717	1.278	1.158	1.249	1.256
测度系数 R^2	0.912	0.978	0.987	0.979	0.980
标准误差 δ	0.077	0.021	0.013	0.020	0.019

度值由0.912迅速上升至2010年的0.980,逐渐趋向完美拟合值1,而标准误差则由起初的0.077快速下降到2010年的0.019,逼近最优值0。值得一提的是,分形形态在局部年份也出现波动,2000年模型拟合度达到全序列最大值,标准误差为最小值,与分维值的波动变化态势类同,在个别时段(2000-2005年)出现退化倾向。

4.2 普遍存在双标度区,具有双分形(bi-fractals)结构

1989-2010年间,武汉城市圈城乡道路网存在无标度性,并且无标度区均较狭窄,普遍在半径110~130 km处出现转折点(图3),即随着回转半径逐步变大,路网长度变化溢出无标度区,网络标度出现间断,形成一新的无标度网络,整体表现为两种类型网络耦合的复杂网络,呈现近似的 双标度 结构。

半径110~130 km处正好界于武汉城市圈核心-外围圈的交界地段,城乡道路网密度出现由密向疏的间断,即交界地段内的核心圈,城乡联系紧密,路网密度较高,发育较成熟,而交界地段外的外围圈层多山地、丘陵地形,尤其是黄冈东北部、黄石阳新、咸宁南部、孝感北部等山区,城乡地域分散,路网稀疏,密度衰减迅速。

由此可判断:第一,武汉城市圈城乡道路网分形发育具有时间连续性(即存在时间惯性),路网发育多以渐变态势为主,具有 路径依赖 ,形成一种复杂而有序的结构,即局部(分界点内外)近似为无标度,而整体去 涌现 尺度迹象。第二,武汉城市圈城乡道路网空间发育呈现集聚趋势,大多数城乡道路网集中于少数区域(武汉城市圈核心圈及城镇密集区),大多数区域城乡道路网分布稀疏,呈现路网分布的核心 边缘格局。这种空间上的不均衡性,恰恰也是城乡道路网结构化和非随机性的基本特征^[22]。第三,武汉城市圈城乡道路网自组织性发育不成熟和不协调,少数地域范围具有高度的城乡道路网连接,即核心城镇密集区路网高度发育,分维值接近1.7的理想值,而外围圈层多数中小城市路网连接较弱,形成明显的两极分化。与发达国家都市圈和中国沿海都市圈路网发育相比,武汉城市圈路网独有的双标度结构是当前路网发育不成熟的重要体现,解决的关键是加大外围圈层城乡道路网建设,完善路网连接程度,以形成相对较成熟的单标度结构,即形成等级有序、分布均衡的路网结构。

4.3 分形不具严格意义,存在一定时空尺度限制

上述分析不同程度表明,城乡道路网分形特征存在一定的无标度区,并且表现出随时间不断发育演化,即城乡道路网的自相似特征只有在一定的时空范围内才会出现。

按照 Benguigui 等的城市分形演化的时空范围判据^[23],不难看出武汉城市圈城乡道路网分形距离严格意义上的 完美值 相差不小,模型拟合度也均未 达标 ,表明在1989-2010年的时间尺度范围内,在全圈域的空间尺度范围内(全点列),整个城乡道路网并未演化发育形成严格意义上的分形,表明城乡道路网分形发育具有时空尺度依赖。随着时间推移,城乡道路网分维拟合度整体持续增加,不断通过自组织演化逼近完美值,整个城乡

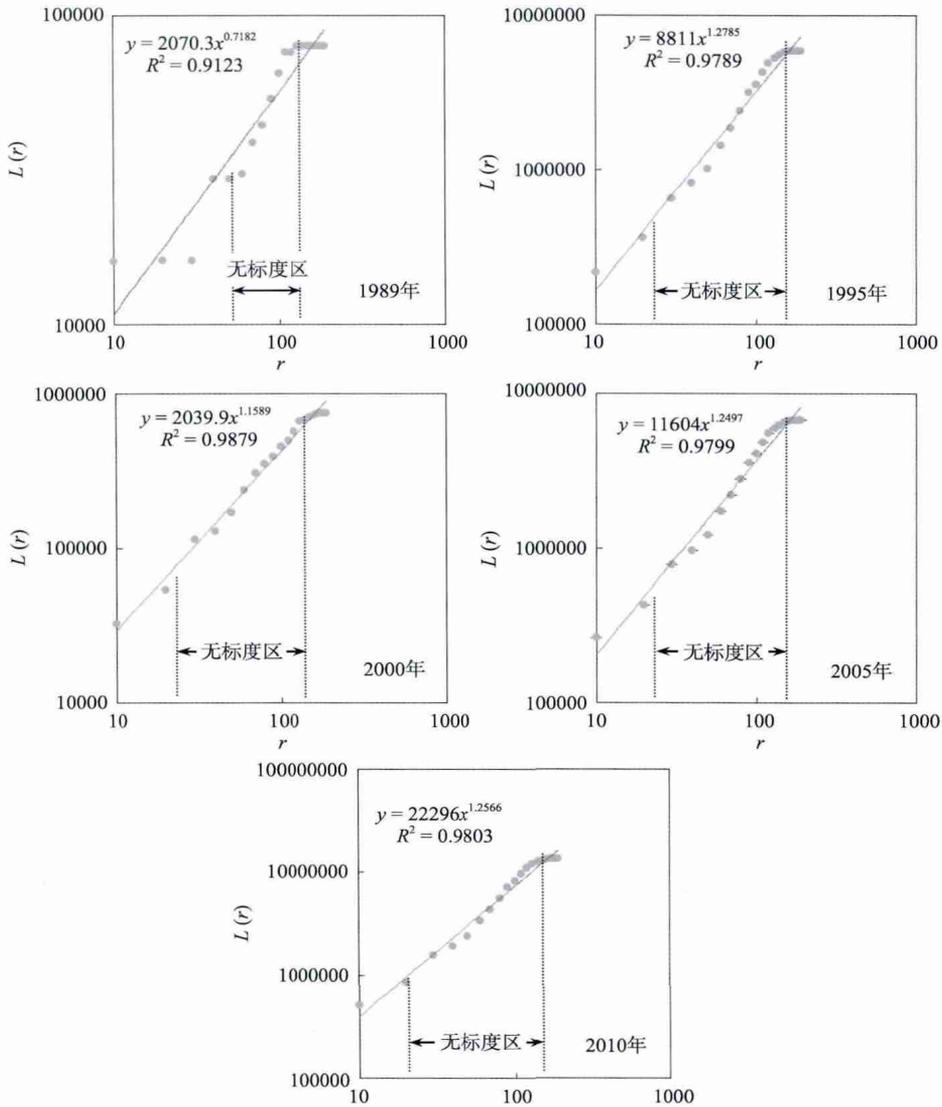


图3 武汉城市圈城乡道路网道路长度-回转半径双对数坐标图 (1989-2010年)
 Fig. 3 The ln-ln plot on the lengths of the URRN in WMA against radial distances from 1989 to 2010

道路网由起初 (1989年) 的0.912 迅速增加到期末 (2010年) 的0.980, 整体上呈迅速上升态势 (表3)。可以预见在不久的将来, 武汉城市圈城乡道路网通过自组织进化, 可以发育形成严格意义上的分形特征 (即拟合度达到0.996以上)。

1989-2010年期间, 五个幂函数拟合曲线图均不同程度出现, 初始数据点和最后数据点部分偏离拟合曲线, 前几个数据点及后几个数据点对整个圈域全点列幂函数拟合曲线稳定性均产生明显影响, 整个城乡道路网自相似性存在无标度区, 尽管不同年份的无标度区间之间存在一定差异, 但普遍在距武汉中心城区 30~60 km 处进入无标度区, 在 100~130 km 处溢出无标度区, 整个圈域城乡道路网自相似性无标度区介于 30~130 km 间, 这个区间范围内的长度 半径维数点列幂函数拟合效果出现一定幅度的增加, 普遍达到0.99 以上, 接近标准值 (0.996), 表明武汉城市圈在这个区间范围内具有严格意义的自相似性, 路网结

构合理,自组织发育较成熟(图3)。

5 结论与讨论

5.1 结论

(1)分形是大自然的优化结构,分形体能够最有效地占据和利用空间。城乡道路网普遍具有分形性质,但在不同等级类型和不同时空尺度下存在一定的差异。通过容量维数的计算均表明,武汉城市圈城乡道路网不同程度表现出分形性即具有结构自相似性,是一正在发展的分形体,表明城乡道路网正处于混沌的边缘,意味着空间复杂性的涌现。

(2)城乡道路网分形最优区间通常认为在 $[1.67, 1.75]$ 间。容量维数的时空分异结果表明,往往城市经济社会发展水平较高城市(两者存在一定的正相关关系),其分维值较其他城市接近最优区间,其城乡道路网具有较佳伸展结构形态;往往随着时间推移,城乡道路网分维值日益逼近最优区间,城乡道路网发育日益成熟,2010年无论是节点-线路规模,还是网络形态连接强度,均表明当前的武汉城市圈城乡道路网具有较大伺服空间效应和较复杂的连接特性。

(3)城乡道路网分形存在一定时空尺度,即存在一个何时、何地才具有分形的条件判断^[22]。在空间上,存在一个无标度区间,在时间上存在一个分形体不断发育成熟的过程;尺度太大,或太小,自相似性都会出现“溢出”而失效。1989-2010年间,武汉城市圈城乡道路网分维值逐步增大,趋近于理想值,路网结构向最佳形态靠近,但也可以看到在个别年份,部分局域网(高等级城乡道路网)分维值超过2,整个城乡道路网空间溢出分形几何最大欧式嵌入空间,此时的城乡道路网不具备严格意义上的分形,分形在时间尺度上具有“选择性”,而非一般理论变换算子的尺度“不变性”。

(4)城乡道路网分形演化是其自组织发展和他组织机制共同作用、相互影响的结果。无论是全域还是局域,武汉城市圈城乡道路网的分形性正呈自下而上(bottom-up)地演化,这种演化在尺度和速率上尽管有所差异,但均是一种正向的演化,分维值上表现为升维的过程,表明整个城乡道路网正向着自组织增强、构型趋优的方面动态进化。与此同时,路网也受到自上而下的(top-down)的行政干扰或调节,往往可能产生两种截然不同的效应:一是强化有序,推动城乡道路网结构不断趋优;二是破坏规则,抑制城乡道路网构型和性能的发育。

(5)城乡道路网分形呈现等级层次性,不同等级路网空间的分形性能存在差异。即道路和节点等级越高,分形性质越是不发育,国道、省道网有待借助分形思想,优化交通网络连接结构。究其原因,整个城乡道路网发育在自下而上的自组织演化过程中,时常伴随着区域交通政策、规划和调控等他组织机制作用,例如国家、省市的交通政策调控和路网规划布局等,尤其是国道和省道等高等级路网受这种自上而下的扰动作用明显,城乡道路网有序的规则常被破坏,致使高等级路网发育迟缓,空间结构松散且失衡,占据和充填空间的能力和效率低下,从而形成路网分形性质发育与路网等级的反比例关系。

(6)城乡道路网分形是系统在混沌的边缘所展现的自组织优化构型,其周期递嬗表现为有序-混沌的交替过程。如城市化一样,城乡道路网的这种周期演化过程也可以通过分维值来刻画,城乡道路网系统何时步入有序,何时步入混沌,都以分维的变化或相对大小的改变为征兆。1989-2010年间,武汉城市圈城乡道路网的容量分维值动态变化态势不完

全统一,整体上呈现上升-下降交替、先快速增加后缓慢下降的变化态势,一定程度表明城乡道路网的分布、充填、关联和渗滤能力和形态的经历了自组织效应加强-减弱的周期性变化过程。

(7) 城乡道路网较符合分形定义和理论模型赋值区间,具有良好的环境包容性。一方面,四大维数分维值多介于 $[1, 2]$ 间,即城乡道路网整体空间维数大于1,突破线性拓扑维数,但未溢出欧式空间维数极限,并且逐步接近理论值(约为1.7左右),整个城乡道路网整体呈良好的网络状组织形态,同时分形具有良好的环境包容性和适应性。

5.2 讨论

(1) 本文因现实道路存在等级差异而采取加权分形模型,以探讨武汉城市圈城乡道路网空间变化特征及不同等级道路发育的空间差异。所得结果虽较好解释了武汉城市圈道路网分形发育的时空特征,但值得注意的是,加权分形模型虽具现实理想意义,但缺乏严格数学论证,通过加权所得结果是否意味着分维,还需更多学者通过系列研究加以论证。

(2) 尽管注重分维值的时序分析,但分形预测分析薄弱。选择1989-2010年的时间序列较短,只有五个时间截面,计算出的系列分维值尽管足够分析其变化特征,但对未来的发展趋势的判据很难确保有效和科学。根据一定时期内的网络分形特征的变化规律分析来预测和模拟未来城乡道路网形态的变化趋势研究有待加强。

(3) 城乡道路网分维值的空间差异性与其城际城乡分布及经济发展水平,并没有表现出强共轭协同的关系。表明除城乡道路网分布格局外,还有许多其他因素影响城乡经济关联作用,如何以经济发展状况指导城际城乡道路网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,有待深入讨论。

参考文献(References)

- [1] Mandelbrot B B. Fractals: Form, Chance, and Dimension. San Francisco: Freeman, 1977: 117-135.
- [2] Thibault S, Marchard A. Roseaux et topologie, Institut National Des Sciences Appliquees de Lyon. Paris: Villeurbanne, 1987: 35-47.
- [3] Frankhouser P. Aspects fractals des structures urbaines. L'Espace Géographique, 1990, 19(1): 45-69.
- [4] Benguigui L, Daoud M. Is the suburban railway system a fractal? Geographical Analysis, 1991, 23: 362-368.
- [5] 陈彦光, 罗静. 河南省城市交通的分形特征. 信阳师范学院: 自然科学版, 1998, 11(2): 172-177. [Chen Yanguan, Luo Jing. The fractal features of the transport network of Henan Province. Journal of Xinyang Teachers College: Natural Science Edition, 1998, 11(2): 172-177.]
- [6] 刘妙龙, 黄佩蓓. 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. [Liu Miaolong, Huang Beipei. Spatial-temporal evolution of fractal feature in traffic network of Shanghai Metropolitan. Scientia Geographica Sinica, 2004, 24(2): 144-149.]
- [7] 余瑞林, 杨华, 刘承良. 武汉市道路交通网络的分形特征. 安庆师范学院学报: 自然科学版, 2009, 15(2): 72-76. [Yu Ruiling, Yang Hua, Liu Chengliang. Fractal features of urban traffic networks in Wuhan City. Journal of Anqing Teachers College: Natural Science Edition, 2009, 15(2): 72-76.]
- [8] 柏春广, 蔡先华. 南京市交通网络的分形特征. 地理研究, 2008, 27(6): 1419-1425. [Bai Chunguang, Cai Xianhua. Fractal characteristics of transportation network of Nanjing City. Geographic Research, 2008, 27(6): 1419-1425.]
- [9] 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. [Guo Jianke, Han Zenglin, Xu Yan. The evolution of urban traffic network of Dalian based on the gathering fractal feature. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2007, 7(5): 121-126.]
- [10] 柏春广, 蔡先华. 中国路网空间体系的分形结构及其区域差异. 交通运输系统工程与信息, 2008, 8(4): 11-15. [Bai Chunguang, Cai Xianhua. Fractal structure and regional differences of spatial system of road network in China.

- Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2008, 8(4): 11-15.]
- [11] 冯永玖, 刘妙龙, 童小华. 广东省公路交通网络分形空间特征研究. 地球信息科学, 2008, 10(1): 26-33. [Feng Yongjiu, Liu Miaolong, Tong Xiaohua. Fractal-theory-based study on highway transportation network in Guangdong Province. Geo-Information Science, 2008, 10(1): 26-33.]
- [12] 朱洪栓. 基于GIS的河南省公路交通网络分形研究. 开封:河南大学硕士学位论文, 2008. [Zhu Hongshuan. Study on fractal properties of highway network in Henan Province based on GIS. Kaifeng: Henan University Master's Degree Thesis, 2008.]
- [13] 张鹏, 韩增林. 辽宁省公路交通网络的分形研究. 交通运输系统工程与信息, 2006, 6(1): 123-127. [Zhang Peng, Han Zenglin. A fractal theory analysis based on Liaoning highway network. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2006, 6(1): 123-127.]
- [14] 刘妙龙, 黄佩蓓. 分形理论在城市交通网络时空演变特征研究中的应用: 以上海市为例. 武汉大学学报: 信息科学版, 2003, 28(6): 749-753. [Liu Miaolong, Huang Peibei. Application of fractal theory to research on the tempo-spatial changes of urban traffic network: Taking Shanghai as a case. Editorial Board of Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2003, 28(6): 749-753.]
- [15] 李江, 郭庆胜. 基于GIS的城市交通网络复杂性定量描述. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2002, 36(4): 534-537. [Li Jiang, Guo Qingsheng. Quantitative representing complexity of urban traffic network based on GIS. Journal of Central China Normal University: Natural Sciences, 2002, 36(4): 534-537.]
- [16] 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. [Sun Zhuangzhi. The study of fractal approach to measure urban rail transit network morphology. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2007, 7(1): 29-38.]
- [17] 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. [Chen Yanguang. A new fractal dimension on transport networks and the method of its determination. Journal of Xinyang Teachers College: Natural Science Edition, 1999, 12(4): 426-434.]
- [18] 许志海, 张昭云. 分形理论在交通网络分布形态研究中的应用. 测绘工程, 2006, 15(1): 27-30. [Xu Zhihai, Zhang Zhaoyun. Application of fractal theory in the study of characterizing the structure of traffic networks. Engineering of Surveying and Mapping, 2006, 15(1): 27-30.]
- [19] 刘承良. 武汉都市圈空间发展机理与调控战略. 北京: 科学出版社, 2009: 170-171. [Liu Chengliang. Development Mechanism and Regulation Strategies in Wuhan Metropolitan Area. Beijing: Science Press, 2009: 170-171.]
- [20] Batty M, Longley P. Fractal Cities: A Geometry of Form and Function. London: Academic Press, Harcourt Brace & Company Publishers, 1994: 121.
- [21] 冯健. 转型期中国城市内部空间重构. 北京: 科学出版社, 2004: 130. [Feng Jian. Interior Space Reconstruction of China City in Transformation Period. Beijing: Science Press, 2004: 130.]
- [22] 陈彦光. 分形城市系统: 标度·对称·空间复杂性. 北京: 科学出版社, 2008: 39. [Chen Yanguang. System of Fractal City: Scaling, Symmetry and Spatial Complexity. Beijing: Science Press, 2008: 39.]
- [23] Benguigui L, Czamanski D, Marinov M, et al. When and where is a city fractal? Environment and Planning B: Planning and Design, 2000, 27: 507-519.

Spatial-temporal structure of capacity fractal about urban-rural road network in Wuhan Metropolitan Area

LIU Chengliang^{1,2,3}, YU Ruilin⁴, DUAN Dezhong⁴

(1. College of Urban and Regional Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 2. Institute for Innovation and Strategic Studies, East China Normal University, Shanghai 20062, China; 3. Hubei Key Laboratory for Geographical Process Analysis and Simulation, Central China Normal University, Wuhan 430079, China; 4. College of Urban and Environmental Science, Central China Normal University, Wuhan 430079, China)

Abstract: Transportation network is the material conditions and prerequisites for the formation of the network system in metropolitan areas. It is also the main channel of material flow, energy flow and information flow, which plays an important role in the socio-economic development of metropolitan areas. Based on urban-rural road network (URRN) in Wuhan Metropolitan Area (WMA), this article systematically revealed the fractal features of URRN's density and its evolution with the application of weighted length-radius fractal model by using GIS spatial analysis methods. The results were obtained as follows. Firstly, the URRN in WMA, to a certain degree, showed the characteristics of spatial complexity and the fractal structure of self-similarity. Secondly, the fractal dimension values of URRN in different grades such as national, provincial, township roads and so on followed the spatial distance decay law. And they were far smaller than the perfect number like 1.702, which showed that the URRN in WMA had a great potential to be improved. Thirdly, the density of URRN with a relatively high grade quickly attenuated from its measuring core to the periphery and represented a strong aggregative distribution pattern around Wuhan city. In contrast, the fractal value of URRN with the low rank grew up slowly, which indicated a strong filling capacity and high level of coverage. Fourthly, both the general and weighted length dimensions of the different URRN grades followed the distance-attenuation law, and they were divided into three spatial parts: core area, transitional area, and marginal area, each with its unique features. Meanwhile, they showed the core-periphery structure and obvious bi-fractals structure. Furthermore, its value of length-radius fractal dimension continually increased, which indicated that the structure of the road network tended to be gradually optimized.

Key words: capacity fractal; spatial-temporal structure; urban and rural network; Wuhan Metropolitan Area