

武汉城市圈城乡道路网的空间结构复杂性

刘承良¹, 余瑞林¹, 曾菊新¹, 王家琦²

(1. 华中师范大学城市与环境科学学院, 湖北 武汉 430079; 2. 湖北大学商学院, 湖北 武汉 430062)

摘要: 以武汉城市圈为研究区, 借助 ArcGIS9.3、Pajek2.7 和 SPSS16.0 等软件, 从节点重要性、可达性、集聚性 3 个方面定量揭示了复杂城乡道路网的空间异质性: ① 高度节点重要性呈幂律分布, 表现出无标度性, 低度节点重要性则基本呈钟型泊松分布, 呈现一定的随机性, 导致整个圈域节点的重要性分布曲线既不遵循钟型泊松分布也不遵循幂律分布, 出现“涌现”性; 节点度值空间分布较均匀, 呈现点状特征和弱集聚性, 具有明显间断性和跳跃性, 表现出一定的“中心—边缘”和“等级圈层”的复合结构; ② 节点的可达性主要由网络平均路径长度、紧密度和介数指标表达, 其中道路网平均路径长度较大, 节点交通联系呈线状组织, 遵循距离衰减律, 成等级圈层分异, 但受快速干道影响明显, 空间收敛减慢, 发生“摄动”变形, 形成两条以南北京珠高速和东西宜黄高速为轴的城市交通走廊; 节点的紧密度系数较随机网络小, 但高紧密度节点在空间分布上较为集中, 呈现出一定的“中心—边缘”空间格局; 节点的介数指标相对较高, 呈现指数分布, 空间分布较均匀, 但仍呈现出一定的“等级圈层”分异; ③ 网络的集聚性空间差异显著, 形成多个大型网络社团, 网络的聚类系数近似为零, 局部呈现耦合性质, 高聚类系数节点集聚成“半月形”展布, 低聚类系数节点分布较为离散。

关键词: 空间复杂性; 复杂网络模型; 城乡道路网; 武汉城市圈

中图分类号: F294.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-0690(2012)04-0426-08

道路网如同血脉, 深入刻画城市肌理, 在城市与区域联系中扮演着至关重要的角色; 作为典型、开放和复杂的巨系统, 其复杂性“涌现”备受学界关注^[1], 集中于交通“物理”、“管理”和“地理”三大领域。相较前两者, 复杂地理交通研究起步较晚, 主要涉及道路网空间形态^[2]、结构及演化^[3-5]、通达性^[6]及其空间效应^[7,8]等方面, 以分形、协同和自组织道路交通研究最盛, 普遍揭示出道路网的空间形态自相似性^[9]、无标度性^[10,11]、小世界性^[12,13]、交通—土地耦合非线性^[14]、空间演化自组织性^[15]等规律。研究尺度包括局域网(Local Network, 包括省级区域、城市内部)^[16]和广域网(Globe Network, 包括全球范围、经济一体化区域和全国范围)^[17]。图论、分形、空间句法等成为道路网空间结构研究的三大理论工具, 然而除分形外, 其它不能算是严格意义上的空间“复杂”研究。

20 世纪末, 基于图论和统计物理的复杂网络

理论兴起, 为道路网复杂性的“地理”研究提供新支撑^[18]。遗憾的是, 从空间视角解读道路网结构复杂性研究仍显不够, 且存在“同归殊途”现象, 即道路网存在是否具有小世界性、无标度性等复杂性质的争议^[19]; 同时研究尺度多以城市内部为主^[20], 城际道路网复杂性研究略显不足^[21], 涉及乡村空间^[22]研究少见。

本文以武汉城市圈为例, 运用复杂网络理论, 从城乡道路网的节点重要性、可达性和集聚性三个方面, 系统定量揭示其空间复杂性机理。一方面实现道路网拓扑结构复杂性的“空间”拓展, 完善和补充道路网空间复杂性理论研究, 另一方面, 以为中国都市圈城乡道路网一体化建设提供理论指导和实践借鉴。

1 研究方法 with 数据

采用数学图论构造城乡道路网连通图, 即将

收稿日期: 2011-06-19; 修订日期: 2011-09-17

基金项目: 国家社会科学基金项目(11CJL048)、华中师范大学研究生教育创新基金项目(2010004)资助。

作者简介: 刘承良(1979-), 男, 湖北武汉人, 副教授, 博士, 主要研究方向为城乡关联空间复杂性。E-mail: chenglianglew@163.com

通讯作者: 余瑞林, 男, 博士研究生。E-mail: yu_80901408@163.com

整个城乡道路网抽象描述为一个由点集 V 和边集 E 构成的连通图 $G=(V,E)$, $n=|V|$ 为网络节点数, $m=|E|$ 为网络边数(表1)。

选择武汉城市圈作为研究区, 地域范围包括武汉及周边100 km范围内的8个城市(包括黄石、鄂州、黄冈、孝感、咸宁、仙桃、天门、潜江)。

根据2010年中国高速公路及城乡公路网地图集(超大详查版)^[24], 使用ArcGIS9.3软件进行矢量化建立城乡道路网空间数据库(图1a); 借助pajek2.7软件, 采用原始法进行拓扑分析, 能真实“载现”城乡道路网空间连接“图景”, 编程获得整个圈域2010年城乡道路网拓扑结构图(包含929个节点、2 453条连线)(图1b)。

2 城乡道路网的空间复杂性

2.1 节点重要性的空间复杂性

2.1.1 节点重要性分布整体出现“涌现”, 呈典型随机性特征

1) 整个节点重要性分布曲线基本遵循泊松分布。整个道路网节点度分布曲线基本呈正态分布(图2a), 超过80%的节点对外连接的公路有3条或4条, 而少于3条(7.9%)和大于4条(3.4%)的节点比例不到20%, 接近正态分布, 表明城乡路网作为“平面图”, 具有随机网络性质。但度值4形成一个“割点”, 即对外连接4条公路的节点与总节点间的比例为24%(237个), 而当节点度为5, 其比例

表1 复杂网络相关指标^[23]

Table 1 Relevant indicators of Complex Networks models

研究内容	研究指标	公 式	涵 义	地理意义
网络节点	度	(1) $C_d(x)=d(x)$	节点 i 的度 k_i 定义为与该节点连接的其他节点的数目	节点对外联系程度
重要性	度分布	(2) $P_k = \sum_{k=k}^n P(k)$	$P(k)$ 表示的是一个随机选定的节点的度恰好为 k 的概率	节点度值的统计性质
	平均路径长度	(3) $L = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} d_{ij}$	N 为网络节点数, d_{ij} 定义为网络中两个节点 i 和 j 之间的距离即连接两个节点的最短路径的边数	网络的通达效率
网络节点	紧密度指标	(4) $C_c(i) = 1 / \sum_{j=1}^n d_{ij}$	d_{ij} 定义为网络中两个节点 i 和 j 之间的距离, 该节点到达其它节点的距离之和的倒数	网络通达的难易程度
可达性	介数指标	(5) $C_b(i) = \sum_{j < k} g_{jk}(i) / g_{jk}$	g_{jk} 节点 j 和 k 之间的最短路径数, $g_{jk}(x)$ 表示节点 j 和节点 k 之间经过节点 i 的最短路径数	节点的交通流负载
	可达性系数	(6) $A_i = [1/L_i + C_c(i) + C_b(i)]/3$	L_i 为节点 i 平均路径长度, $C_c(i)$ 为节点 i 紧密度指标, $C_b(i)$ 为节点 i 介数指标	节点的可达性
网络节点	聚类系数	(7) $C_i = E_i / [k_i(k_i-1)/2]$	节点 i 有 n 个近邻点, 那么这 n 个节点之间最多有 $k_i(k_i-1)/2$ 条连线, 以这 n 个点之间的实际连线数目 E_i 除以 $k_i(k_i-1)$ 得出的值定义为 i 点的聚集系数	节点与相邻节点连接的集聚性

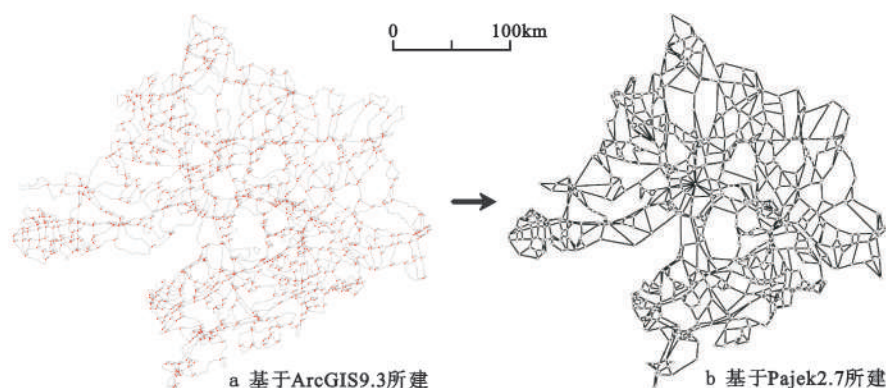


图1 武汉城市圈城乡道路网空间数据

Fig.1 Spatial data of the urban-rural road network in Wuhan Metropolitan Area

骤然下降到3.2%(30个),整个曲线不呈典型的“钟形”特征,具有一定程度的“右倾”。

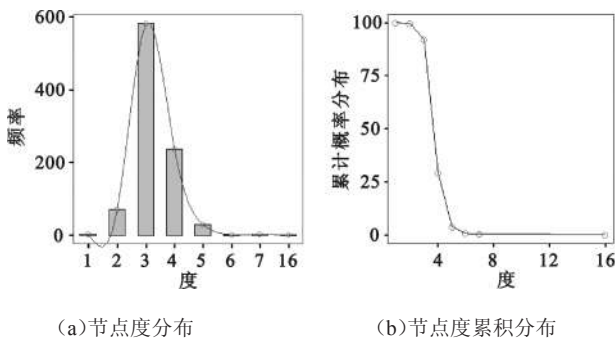


图2 道路网节点度分布及累积概率分布

Fig.2 The statistical distribution of node degree and cumulative probability

2) 整个节点重要性分布曲线不遵循幂律分布。

D_i 的平均数 $D_m=3.27 \approx 4$, 对应的 $V_m=237$; 而节点度最小值 $D_{\min}=1$ 和最大值 $D_{\max}=16$ 分别对应 $V_{\min}=3$ 和 $V_{\max}=1$, 大大小于平均值, 即不存在比平均数高或低很多的节点度, 也不存在少数具有众多连结(比平均数高或低许多的 D)的“集散节点”, 整个网络不具有无标度性(图2b)。

3) 低度节点占据主导, 高度节点相对较少。

界定度值大于平均值(3.27)的节点为高度节点, 是圈域网络的重要节点, 占据主导和核心地位, 小于平均度值的节点为低度节点, 为相对不重要节点, 处于依附和从属地位, 整个城乡路网低度节点比例超过70%, 高度节点不到30%, 整体连接水平不高。

4) 道路网局部表现出随机性(次干道网)和无标度性(主干道网), 整体出现“涌现”。

去掉主干道(国道和省道)获取整个县、乡道网的节点度分布曲线, 发现其成明显的钟形正态分布(泊松分布), 高斯曲线拟合的判定系数达到0.963, 整个次干道网遵循一定的随机网络分布特征; 去掉次干道(县道和乡道), 主干道网节点度与度累计概率分布遵循指数 $2 < \gamma < 3$ 的幂律, 逼近3, 符合标准B-A模型的总结规律^[21], 局域网(主干道网)呈无标度律特征; 而整个道路网全局则表现出介于随机网络和无标度网络间的复杂“涌现性”。

2.1.2 节点重要性空间分布较均, 但仍表现出一定分异性

1) 节点度值空间分布均匀, 呈点状特征, 高度节点呈明显间断性和跳跃性散布。

除核心圈域外, 度值为3的节点空间分布较为均匀。受整个圈域经济发展、自然条件、历史基础和政策体制差异影响, 度值大于4的高度节点集中武汉、鄂州、黄石、黄冈等核心城市市区及其周围, 其他乡镇地区相对较低, 尤其是黄冈东部、黄石和咸宁南部及孝感西北部, 相对低度节点的均质分布, 高度节点分布比较间断, 具有跳跃性(图3)。

2) 节点度值呈现一定弱集聚性, 表现出以武汉市为极核的核心—边缘结构。

节点的度值具有一定的空间分异, 高度节点相对集中分布于武汉市及周边核心城镇, 点度全局空间自相关 Moran's I 指数达到-0.177(略大于 Moran's I 检验值), 与低度节点表现出一定弱倾向空间邻接集聚。其中, 最大为武汉市城区(16), 成为整个圈域道路网的极核; 外围地区, 随距离增加, 度值逐渐降低, 普遍不超过5, 处于发展的边缘, 呈依附地位, 形成一定的“核心—边缘”结构(图3)。

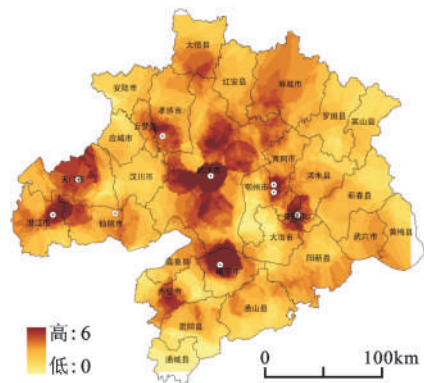


图3 节点度空间分布

Fig.3 Spatial distribution of node degree

3) 节点度值呈环状空间分异, 形成一定的以武汉为中心的等级圈层结构。

圈域城乡道路网节点度值等级差异明显, 可划分为4个等级区间: 度值极值区(度值为16)、度值高度区(度值大于4)、度值中度区(度值为3)、度值低度区(度值为1和2)。空间上相应形成三大圈层: 核心圈层—武汉城区(度值极值区和高度区); 中间圈层—咸宁、孝感、黄石等城区(度值中度区); 外围圈层—黄冈东北部、孝感北部、仙桃、潜江、天门、咸宁南部(度值低度区)。

4) 高度节点分布表现出一定的东西差异, 受区域自然—经济条件影响明显。

度值较大的节点主要集中在圈域的中西部地区,如武汉中部、咸宁北部、孝感南部、天门、潜江;东部黄冈和黄石等大部分,分布较少,仅黄石、鄂州城区有少量分布。究其原因:圈域西部地带地处江汉平原,社会经济发达,交通道路发育较为完善,成格网状,节点对外联系强度较大;东部地区主要是山地和丘陵,地形复杂,道路网发育不完善,多成树枝状,节点对外联系强度小(图3)。

5) 节点度值与其自身等级规模存在关联,呈现一定的城乡体系—连接程度同构

从点度空间分布来看,高度节点多为高等级城镇(地处中心城市城区),度值为6、7的有5个节点,分别为咸宁、黄石、鄂州、孝感四市城区和武汉近郊区(施岗),这些都是圈域交通对外集散流较大的节点,其中咸宁、黄石、鄂州是圈域网络与东部城乡交通往来的关键节点,孝感、施岗等城镇是核心武汉与北部城乡对外联系的核心枢纽。

从要素相关性来看,选取大量城镇级以上城乡节点,开展其点度与总人口的相关分析,二者皮尔逊相关系数达到0.687,城乡路网节点度值与其城镇人口等级规模呈现一定的正相关,揭示出城乡路网发育与城乡人口分布保持一定的共轭协同关系,整个路网的度值等级规模分布受城镇人口等级组织影响显著,呈现一定的以人类活动为主体的被组织效应,也体现了城乡道路网在圈域空间发展中的交通伺服功能和对组织结构的“雕刻”作用。

6) 受交通规划和地形地貌的影响比较明显,呈现一定自—他组织效应

从地理区位来看,节点度主要为3,其次是2、4,主要是整个圈域多数两两城镇对之间无直通的连线,城乡道路网缺少众多环路所致。究其原因,一方面交通规划充分考虑建设两两城镇对直通路和城乡环路的不经济,另一方面道路网受复杂多样的地形条件限制,整体环路和直通路连接既无必要,也无可能,整个网络发育一定程度表现为人为调控和自然限制作用下的自—他组织形态。

2.2 节点可达性的空间复杂性

2.2.1 整体对外连接可达性差,具有等级层次性结构

1) 平均路径长度较大,紧密度指标相对较小

武汉城市圈城乡道路网的平均路径长度 $L=17.81$,大于同等规模的随机网络($L=6.64$),表明圈

域道路网平均路径长度相对较大,节点间中转平均需要18个节点,具有“十八度分离”特征。

而平均紧密度指标为0.060,较随机网络的紧密度(0.12)小,说明圈域道路网城乡节点对之间的交通联系相互影响较小,具有独立的对外关系,城乡一体化程度较弱(图4)。

2) 介数指标呈幂律分布,路网呈现等级层次性

介数是指所有节点对的最短路径中经过该点的数量比例,反映了节点的影响力和流量承载力。整个道路网节点介数指标呈较典型幂律分布(幂指数拟合程度达到0.903),一方面遵循Zipf法则,节点路径选择具有“集核偏好性”,道路网形成有序的等级层次结构,另一方面交通流量集中在少数几条关键性道路上,道路网比较脆弱,一定程度揭示圈域城乡道路网节点具有规模的等级层次性和交通路径选择的自组织性(图4)。

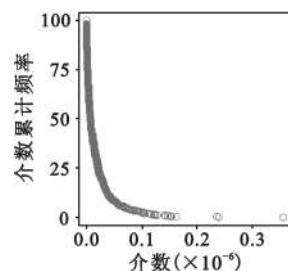


图4 网络节点介数累计

Fig.4 Cumulative distribution of node betweenness

2.2.2 空间分异明显,呈现核心—边缘和等级圈层的复合结构

1) 节点紧密度值存在空间分异,呈现“核心—边缘”空间格局

从空间自相关来看,空间单变量全局自相关Moran' I 指数超过0.4,节点紧密度表现出较明显的群体空间集聚特征,形成以圈域核心圈层(集中于武汉、鄂州、黄石城区及大冶市、黄冈城区及团风县等县城)为主的高—高类型和以圈域外围圈层(集中于仙桃、天门、潜江、黄冈东北部大别山区、咸宁南部幕阜山区县域)为主体的低—低类型两大连片集聚区(图5a)。

从空间分布来看,高紧密度节点高度集中于圈域核心城市—武汉市主城区,路网发育呈现“垄断性”伺服,成为整个圈域的核心圈层,而外围圈层(如大别山区、幕阜山区)的城乡节点相互关联作用较弱,紧密度多低于圈域平均水平,成为城乡

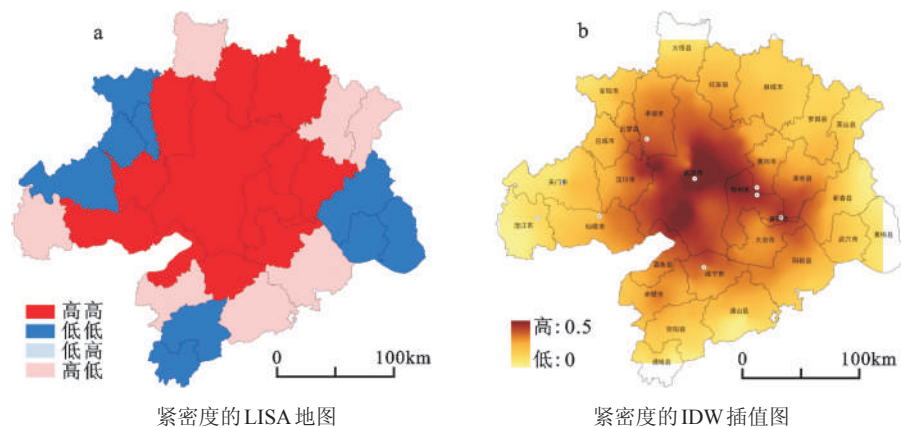


图5 紧密度的空间分布

图5 Spatial distribution of closeness

路网可达性服务的“边缘”，整个圈域城乡节点紧密度值呈现“核心—边缘”圈层结构(图5b)。

2) 节点介数分布较为均匀,但高介数节点相对集中,呈侧N形展布

除去武汉等9个重要中心城市外,其他城乡节点的介数相当,整体上介数分布较为均匀,绝大部分节点对全网不具备绝对影响(小于0.1),城乡节点等级及其对外服务辐射能力相差不大,空间分异不明显。介数极值位于武汉(0.358),表明武汉市交通流量和负荷承载巨大,凸显其圈域经济核心地位;高介数的节点往往为高等级城镇(各中心城市城区、重要县城所在地、道路网重要交叉口等),与城乡等级规模成正比,主要集中于潜江—仙桃—武汉—鄂州—黄石—咸宁—赤壁城区一线,这些节点多为区域的经济政治中心,交通网络发育相对较完善,对外服务辐射范围广,交通流汇聚潜力较大,空间上成一独特的侧N形结构(图6)。

3) 节点平均路长由武汉向周围梯度递减,呈

明显的等级圈层结构

圈域城乡节点平均路长遵循“距离衰减律”,呈现以武汉为中心的不规则圈层结构,与圈域城镇体系空间“靶形分布”一致。具体表现为:距武汉中心城区由近至远,平均路长逐渐增大,形成较明显的三大圈层:高通达性圈(圈域核心圈层:武汉市区及其周边城镇)、中通达性圈(圈域中间圈层:武汉市边缘及鄂州、黄石、咸宁、黄冈等市区)、低通达性圈(圈域外部圈层:如潜江、仙桃、孝感、黄冈东北部、黄石东部、咸宁南部等地区)(图7)。

4) 节点平均路长“十字状”空间收敛缓慢,形成南北京珠高速、东西宜黄高速两条交通走廊

受高等级快速城际干道等交通因素影响,节点平均路长的同心环状结构日益不规则化,产生沿快速干道“摄动”变形。南北向京珠高速、东西向宜黄高速沿线城乡节点交通条件优越,可达性水平较高,导致可达性系数等值线向外“突出”,空间收敛变慢,形成“星状”等可达性圈层结构和“十

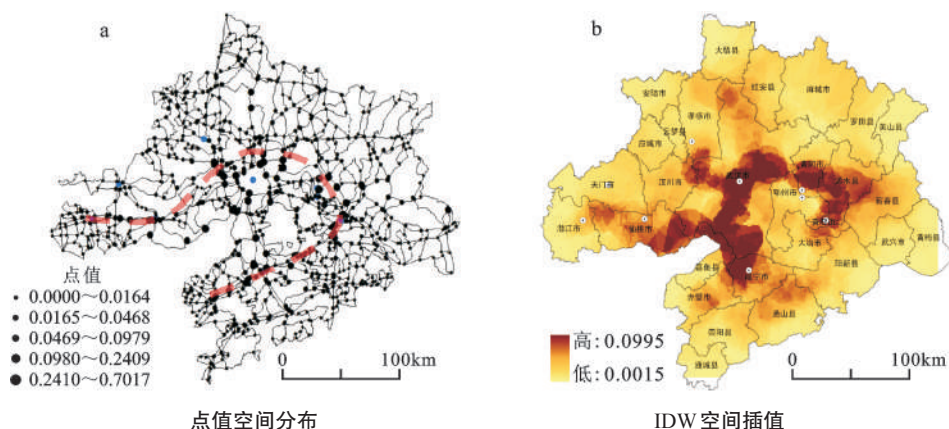


图6 节点介数空间分布

Fig.6 Spatial distribution of the nodal betweenness

字状”东西、南北两条城市交通走廊(图7)。

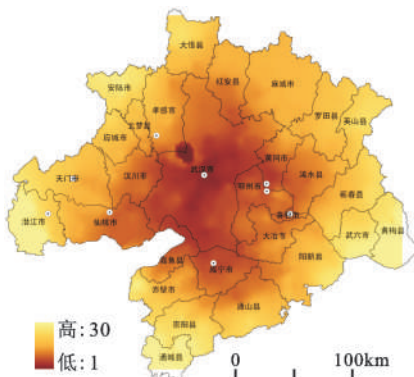


图7 节点可达系数的空间分布

Fig.7 Spatial pattern of accessibility

2.3 网络的集聚性的空间复杂性

2.3.1 道路网整体呈弱集聚性,局部一整体存在分异

1) 整体呈偏态分布,宏观呈现树枝状结构形态

城乡路网节点聚类系数分布呈偏态分布,以聚类系数=0节点为主。全域网络聚类系数为0的节点有548个,占节点总数的80.7%,整个城乡路网聚类系数为0和大于0节点较稳定地遵循“80/20”原则。

整个网络的平均聚类系数为0.13,近似为零,大部分节点与其相邻节点间缺乏直接连接,成为孤立节点;尽管聚类系数远小于1,接近0,但比同等规模下的完全随机网络的聚类系数大很多,路网整体具有明显的聚类效应。

同时节点平均度基本不超过3,表明任意三个节点间通常没有直接连通的轨道使它们形成环路,绝大部分节点间平均只有2~3条线路连接,整个城乡路网呈树枝状宏观格局,并未完全发育生成大量环路镶嵌的“格状网络”结构。

2) 局部呈现耦合性质,局域网表现出网格一环状结构

尽管大多数节点的集聚系数为零,但网络中仍有10个节点聚类系数为1,这些城乡节点“抱团成群”,构成一个局部网络,形成一个完全连通图,呈现出一种全局耦合的性质,在节点连接上表现出“环环相扣”的网格状结构。可以较清晰的得

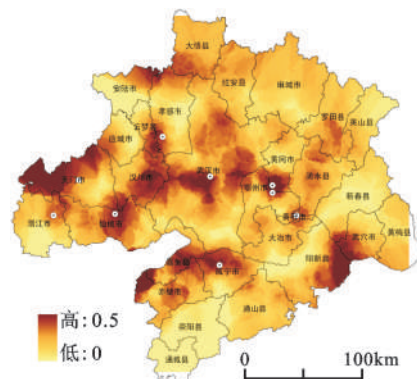


图8 节点聚类系数空间分布

Fig.8 Spatial pattern of the clustering coefficients

出,整个城乡路网在随机连接基础上不断趋于有序,接近规则网络组织形态,既在整体上表现出稳定的树枝状有序结构,也在局部呈现出一定的网格状耦合结构。

2.3.2 道路网整体分布较均匀,呈现一定弱集聚性

1) 道路网节点聚类系数整体较低,分布离散成片

整个城乡道路网大部分节点聚类系数较小,相较度值,空间分布均匀离散,节点连接空间发散成面状均质片区,相对集中分布于潜江、黄冈东北部、孝感、咸宁南部、黄石东南部等地区,在时间变化上持续保持较高水平,具有较强的空间“惰性”和“惯性”,在空间分布上具有一定的空间连续性,整体成“板块”分布(图8)。

2) 道路网呈弱集聚性,高聚类系数节点呈“半月形”展布

选择随机网络和空间近邻网络作为参照系^①,节点平均聚类系数相较同等规模下的随机网络大许多,完全不同于随机网络的均匀分散连接,城乡路网节点整体连接呈现弱集聚性;同时,节点平均聚类系数也略大于空间近邻网络的平均聚类系数,表明城乡节点连接呈现一定的“局部空间收敛”,空间上倾向形成几个高聚类系数节点集团(团块),主要集中于一个中心地带(宜黄高速沿线及武汉城郊地段)和一个边缘地带(阳新东部、赤壁西部等),相互联系较紧密,基本实现了资源共享和局部耦合,呈现“局域”的网络社团发育,明显形成以武汉城区为中心,黄冈—鄂州—黄石城区、孝感西北—仙桃中部、赤壁—嘉鱼—咸宁城区3个

① 其中随机网络通过Pajek2.7生成和计算,空间邻近网络则是借鉴了复杂网络中“每个节点只和周围的邻居节点相连”规则网络的构建经验,仅考虑最短拓扑距离联系构建网络,具体通过ArcGIS9.3和Matlab7.0生成计算。

“半月形”集团(图8)。

3 结 论

1) 节点的重要性空间分布存在差异。高度节点重要性呈幂律分布,表现出无标度性,低度节点重要性则基本呈钟型泊松分布,呈现一定的随机性,导致整个圈域节点的重要性分布曲线既不遵循钟型泊松分布也不遵循幂律分布,出现“涌现”性;节点度值空间分布较均匀,呈现点状特征和弱集聚性,具有明显间断性和跳跃性,表现出一定的“中心—边缘”和“等级圈层”的复合结构。

2) 节点的可达性指标呈现不同空间特征。其中道路网平均路径长度较大,节点交通联系呈线状组织;节点的紧密度系数较随机网络小,但高紧密度节点在空间分布上较为集中,呈现出一定的“中心—边缘”空间格局;节点的介数指标相对较高,呈现幂律分布,空间分布较均匀,但仍呈现出一定的“等级圈层”分异。整个圈域节点可达性遵循“距离衰减律”,但受快速干道影响明显,发生“摄动”变形,形成两条以南北京珠高速和东西宜黄高速为轴的城市交通走廊。

3) 网络的集聚性空间差异显著,形成多个大型网络社团。网络的聚类系数近似为零,整体呈树状结构组织,局部呈现耦合性质和网格—环状形态;网络表现出弱集聚性,高聚类系数节点相对集聚成“半月形”展布,形成三大社团,而低聚类系数节点分布较为离散,分布连续成片。

参考文献:

- [1] Barabasi A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, **286** (5439):509-512.
- [2] Karsky K J. Structure of Transport Networks: Relationships Between Network Geometry and Regional Characteristics[D]. Chicago: University of Chicago Research papers, 1963: 84-155.
- [3] Hillier B. Configurational modeling of urban movement networks[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 1998, **25**:59-84.
- [4] Helbing D, Keltsch J, Molnar P. Modelling the evolution of human trail systems [J]. Nature, 1997, **388**:47-50.
- [5] 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[J].武汉大学学报·信息科学版, 2003, **28**(6):749~753.
- [6] 曹小曙,薛德升,阎小培.中国干线公路网络联结的城市通达性[J].地理学报, 2005, **60**(6):903~910.
- [7] 杨荫凯,金凤君.交通技术创新与城市空间形态的相应演变[J].地理学与国土研究, 1999, **15**(1):44~47.
- [8] Schaeffer K H, Elliott S. Access for all: Transportation and Urban Growth[M]. Baltimore Md.: Penguin, 1975.
- [9] Kim K S, Bengguigui L, Marinov M. The fractal structure of Seoul's public transportation system[J]. Cities, 2003, **20**(1): 31-39.
- [10] 胡一斌.基于复杂网络的交通网络复杂性研究[D].上海:复旦大学, 2008.
- [11] Lämmer Stefan, Gehlsen Björn, Helbing Dirk. Scaling laws in the spatial structure of urban road networks[J]. Physica A, 2006, **363**:89-95.
- [12] Jiang B, Claramunt C. Topological analysis of urban street networks[J]. Environment and Planning B, Planning and Design 2004, **31**: 151-162.
- [13] Latora V, Marchiori M. Is the Boston subway a small-world network?[J]. Physica A, 2002, **314**:109-113.
- [14] 姜克锦.城市用地——交通综合系统演化机理与优化研究[D].成都:西南交通大学, 2009.
- [15] Bossomaier T, Green D. Patterns in the Sand: Computers, Complexity and Life[M]. Reading, Massachusetts: Perseus Books, 1998.
- [16] Guimerà R, Mossa S, Turtshi A, et al. The worldwide air transportation network anomalous centrality, community structure, and cities global roles[J]. PNAS, 2005, **102**(22): 7794-7799.
- [17] Michael T. Gastner, Newman M.E.J. The spatial structure of networks[J]. European Physical Journal B, 2006, **49**:247-252.
- [18] 王姣娥,莫辉辉,金凤君.中国航空网络空间结构的复杂性[J].地理学报, 2009, **64**(8):899~910.
- [19] 莫辉辉,王姣娥,金凤君.交通运输网络的复杂性研究[J].地理科学进展, 2008, **27**(6):112~120.
- [20] Reggiani A, Lampugnani G. Towards a typology of European inter-urban transport corridors for advanced transport telematics applications[J]. Journal of Transport Geography, 1996, **3**(1): 53-67.
- [21] 宗跃光,陈眉舞,杨 伟,等.基于复杂网络理论的城市交通网络结构特征[J].吉林大学学报(工学版), 2009, **39**(4):910~915.
- [22] 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[J].地理研究, 2007, **26**(5):1005~1002.
- [23] 汪小帆,李翔,陈关荣.复杂网络理论及其应用[M].北京:清华大学出版社, 2006:9~11.
- [24] 刘 力,之江仁,夏生魁,等.中国高速公路及城乡公路网地图集(超大详查版)[M].济南:山东省地图出版社, 2010.

Complexity of Spatial Structure on the Urban-rural Road Network in Wuhan Metropolitan Area

LIU Cheng-liang¹, YU Rui-lin¹, ZENG Ju-xin¹, Wang Jia-qi²

(1. School of Urban and Environmental Science, Huazhong Normal University, Wuhan, Hubei 430079, China;

2. Business School, Hubei University, Wuhan, Hubei 430062, China)

Abstract: Studies on the complexity and non-linearity of the spatial structure of road networks have attracted increasing attention during the past several years. However, few efforts have been devoted to the spatial and structural properties of large-scale road networks. In addition, most of current studies focused on either spatial morphology of road networks or structural pattern of road structure, while a comprehensive analysis on the spatial restriction of road network structures is ignored. To fill in the knowledge gap, this article introduces a series of approaches to uncover the spatial influences on the structural characteristics of general road networks. The road network of Wuhan Metropolitan Area (RNWMA) is taken as a case study and the spatial heterogeneity of the structure of RNWMA is analyzed from three aspects with the help of software including ArcGIS9.3, Pajek2.7 and SPSS16.0. Three aspects of spatial heterogeneity of the RNWMA are studied, which are importance of road intersections, accessibility of road intersections and clustering of road intersections. For each property, both statistic analysis and spatial distribution analysis are carried out. Results are visualized by map or chart. Possible explanations are also given. It is found that in the RNWMA: 1) the importance values of roads with high accessibilities in RNWMA follows a power-law distribution, which may indicate that the RNWMA is a scale-free network. While the importance values of roads with low accessibilities follow a Poisson distribution. The co-existence of scale-free and random properties for roads with different accessibility makes the entire road network a complex system with some “emergent” properties; 2) the average length of the shortest path between two roads is relatively large. While the traffic links between two roads in terms of topological distance follow the law distance decay and obvious hierarchy circles can be observed. The spatial convergence of the shortest path length is significantly influenced by roads with high hierarchy (e.g. expressway) and shows perturbation deformation. Two urban transportation corridors, i.e., the Beijing-Zhuhai (north-south) and Yichang-Huangshi (west-east) are observed. Besides, statistically the values of the betweenness of road intersections show exponential distribution although spatially they are relatively even; 3) The clustering coefficient for the RNWMA approaches zero, while several network communities are observed. The spatial distribution for the road intersections with large value of clustering coefficient are “crescent” like, and road intersections with low clustering coefficient values are sparsely distribution in the region. Attempt made in this study will not only help to interpret the structural organization and growth in a limited geographical space, but also shed light on visual analytic means for geographic environments. It is our hope if the findings of this article can provide any alternatives for current road network study, and give practical supports for the construction of urban-rural road network.

Key words: spatial complexity; Complex Network Model; urban-rural road network; Wuhan Metropolitan Area