

# 城市群城镇交通网络特性研究<sup>\*</sup>

## The Properties of Traffic Networks in Urban Agglomeration

王国明<sup>1</sup>, 李夏苗<sup>1</sup>, 杨 波<sup>1</sup>, 胡正东<sup>1,2</sup>

WANG Guo-ming<sup>1</sup>, LI Xia-miao<sup>1</sup>, YANG Bo<sup>1</sup>, HU Zheng-dong<sup>1,2</sup>

(1. 中南大学交通运输工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 南华大学, 湖南 衡阳 421001)

(1. School of Traffic and Transport Engineering, Central South University, Changsha 410075;

2. University of South China, Hengyang 421001, China)

**摘 要:**为了研究城市群城镇交通网络特性,本文运用 primal approach 方法以城镇为节点,以其之间的道路为边构造长沙城镇交通网络、株洲城镇交通网络等城市群城镇交通网络模型,使用 Matlab 和 VC++6.0 分别对它们的平均度、网络密度、聚集系数、平均最短路径、随机网络聚集系数、随机网络平均最短路径、网络结构熵、全局系数等网络特性指标进行计算和比较分析,得到以下结论:(1)城市群城镇交通网络都具有小世界性,是小世界网络;(2)城市群城镇交通网络都不存在幂律特征,不存在无标度性,不是无标度网络;(3)城市群城镇交通网络都不存在指数特征,不是随机网络;(4)城市群城镇交通网络中,长株潭城市群市县交通网络整体效率最高、网络密度最大,长株潭城市群城镇交通网络结构熵最小,表明其最有序。

**Abstract:** In order to research properties of traffic network of urban agglomerations, We design the model of Urban Agglomeration by primal approach to describe the Changsha traffic network, the Zhuzhou traffic network, the Xiangtan traffic network, the C-Z-T city traffic network, the C-Z-T city and town traffic network, the C-Z-T city and town traffic network. We use Matlab and VC++6.0 to figure out averaged-degree, averaged-clustering coefficient, betweenness centrality of roads with degree and structure entropy based on node betweenness centrality, global coefficient. The results show that (1) traffic networks have small-world behavior but no scale-free property (2) traffic networks have not scale-free and random property, (3) the global coefficient of the C-Z-T city traffic network is greatest and the entropy of the C-Z-T city and town traffic network is smallest, which show it is in order.

**关键词:**城市群;交通网络;小世界性;无标度性

**Key words:** urban agglomeration; traffic network; small-world property; scale-free property

**doi:** 10.3969/j.issn.1007-130X.2012.12.031

**中图分类号:** U113

**文献标志码:** A

## 1 引言

城市群在国家和社会经济中的作用越来越明

显,成为人类社会经济发展的空间形态,是一种普遍形式,是人口、资金、技术的聚集地,也是国际与地区竞争的核心力量。而城市群城镇交通网络是城市群发展的基础支撑,也是城市群发展的保障。

<sup>\*</sup> 收稿日期:2011-12-30;修订日期:2012-03-01  
基金项目:国家自然科学基金资助项目(71071165)  
通讯地址:351100 福建省莆田市市政府 6 号楼 308 室  
Address: Room 308, 6th Building, Government of Putian, Putian, Fujian 351100, P. R. China

在中国城市群经济社会快速发展的情况下,需要对城市群交通网的基本特性、网络结构、整体性能等方面深入研究。

运用复杂网络理论对交通运输网络各种特性研究越来越多。文献[1] Sen P 研究表明印度铁路网络具有小世界特性。文献[2]研究表明合肥公共交通网络具有明显的小世界性。文献[3]以北京市公交系统为例,用二分图模型对其进行描述,分别构建出公交站点网络和公交线路网络,发现北京市公交系统具有小世界网络的性质。文献[4]研究了中国北京、上海、南京等城市的公交网络的特性。Sienkiewicz J 和 Holyst J A<sup>[5]</sup> 研究表明波兰的 22 个城市公共交通网络具有小世界特性。文献[6]分析了北京市公交网络的无标度及小世界特性。这些研究都是针对城市公共交通复杂网络的研究。在我国城市群现象凸显的情况下,对城市群城镇交通复杂网络有待深入研究。本文对城市、城镇及与之相连的道路构建复杂网络,通过对不同范围、不同层次的城市群城镇网络的研究,可以了解城镇交通网络整体状况和网络的特性,对城镇建设和城镇之间的道路建设具有极为重要的指导借鉴意义,也为城市群城镇网络的稳定性、安全性、网络演化、动力学特征的理论发展做了基础研究。

2 复杂网络的符号说明及统计指标

国内外学者已经提出一些重要的复杂网络统计指标,包括网络直径、平均最短路径、网络密度等等,本文根据研究需要选用表 1 中所列符号及复杂网络统计指标。

3 城市群交通网络构建

根据城市群城镇交通网络特性研究的需要,将地图上城镇和城镇之间道路抽象成网络模型,可借鉴城市交通网建模的相关研究成果。城市交通网络的抽象方法有两种:一种就是 primal approach<sup>[7,8]</sup>,另一种就是 dual approach<sup>[9]</sup>。本文主要研究城市群城镇交通网络,因而采用以城镇为节点、以城镇之间的道路为边的 primal approach 方法构造城市群城镇交通网络。

根据长株潭城市群 2011 年 12 月百度地图,选择长株潭城市群中长沙市、株洲市、湘潭市、宁乡县、望城县、浏阳市、长沙县、株洲县、湘潭县、醴陵市、湘乡市、韶山市等 12 个县级以上城市及其 181 个乡镇及其与之联系的道路分别构建长沙城镇交通

表 1 复杂网络的符号说明及统计指标

| 符号                        | 符号含义                                 | 统计指标名称     | 网络统计指标公式                                                                    | 统计指标说明                                             |
|---------------------------|--------------------------------------|------------|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| $d_{ij}$                  | 交通网中两个节点距离                           | 平均度        | $\langle k \rangle = \frac{\sum_i k_i}{N} = \frac{2E}{N}$                   | 节点平均度越大,与该点直接相连道路数就越多                              |
| $N$                       | 交通网络节点数                              |            |                                                                             |                                                    |
| $L$                       | 交通网的平均路径长度                           | 平均路径长度     | $L = \frac{1}{\frac{1}{2}N(N-1)} \sum_{i \neq j} d_{ij}$                    | 所有节点之间最短路径长度的平均值,可以表示网络的连通性                        |
| $D$                       | 交通网络直径                               |            |                                                                             |                                                    |
| $\langle k^{(n)} \rangle$ | $n$ 阶平均连接度 $\langle k^{(n)} \rangle$ | $n$ 阶平均连接度 | $\langle k^{(n)} \rangle = \frac{\sum_i k_i^{(n)}}{N} = \frac{2E^{(n)}}{N}$ | 节点平均 $n$ 阶度越大,则与该点相连的 $n$ 阶道路数就越多                  |
| $\rho$                    | 网络密度                                 | 网络密度       | $\rho = \frac{\langle k \rangle}{N-1}$                                      | 反映网络疏密程度的指标                                        |
| $C_i$                     | 局部聚集系数                               | 局部聚集系数     | $C_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i-1)}$                                             | 反映 $i$ 网络的聚集程度的一个重要参量                              |
| $C$                       | 交通网络的平均聚集系数                          | 平均聚集系数     | $C = \sum_k p(k) C(k)$                                                      | 反映网络的聚集程度的一个重要参量                                   |
| $C^{(n)}$                 | 交通网络 $n$ -聚集系数                       | $n$ -聚集系数  | $C^{(n)} = \sum_k p(k^{(n)}) C^{(n)}(k^{(n)})$                              | 反映网络的聚集程度的一个重要参量                                   |
| $B(i)$                    | 交通网络介数                               | 介数         | $B(i) = \sum_{j=k} \frac{\sigma_{jk}(i)}{\sigma_{jk}}$                      | 反映了节点 $i$ 的影响力。经过节点 $i$ 的最短路径越多,就表明节点 $i$ 所承受的流量越大 |
| $B(k)$                    | 交通网络介数中心性                            | 介数中心性      | $B(k) = \sum \frac{B(i)}{n(k)}$                                             | 介数中心性表征网络节点对信息流动的效果                                |
| $S$                       | 交通网络结构熵                              | 结构熵        | $S = -\sum B(i) \ln B(i)$                                                   | 反映交通网络的有序状况                                        |
| $E_{\text{global}}$       | 交通网络全局效率                             | 全局效率       | $E_{\text{global}} = \frac{1}{N(N+1)} \sum_{j=i} \sum_{ij}$                 | 表示网络节点间联系的强弱。                                      |

网络、株洲城镇交通网络、湘潭城镇交通网络、长株潭城市群市县城市交通网络、长株潭城市群城镇交通网、长株潭城市群城镇乡交通网如图 1~图 6 所示,其中市代表市区、县代表县城、镇代表镇中心区。

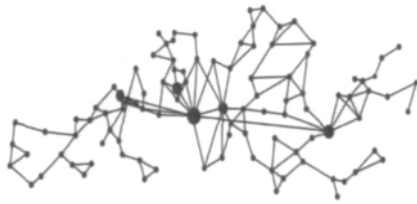


图 1 长沙城镇交通网络



图 2 株洲城镇交通网络



图 3 湘潭城镇交通网络

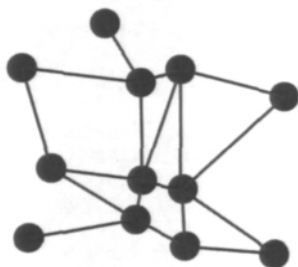


图 4 长株潭城市群市县城市交通网络

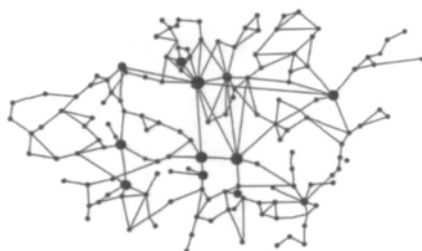


图 5 长株潭城市群城镇交通网



图 6 长株潭城市群城镇乡交通网

从图 1~图 6 中,提取六个城市群城镇交通网的数据,再根据六个长株潭城市群城镇交通图数据使用 gephi 软件制成城镇交通网络无权无向图,分别如图 7~图 12 所示。

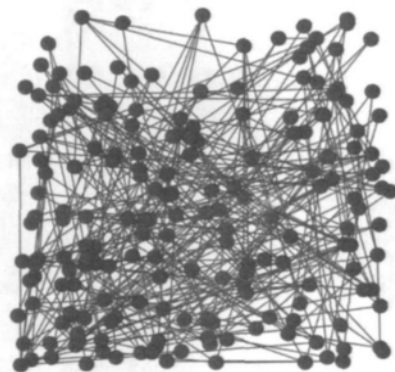


图 7 长沙城镇交通网络

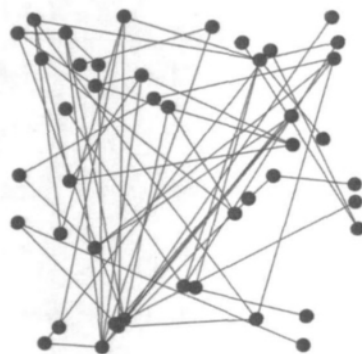


图 8 株洲城镇交通网络

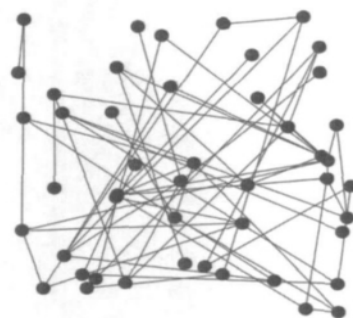


图 9 湘潭城镇交通网络

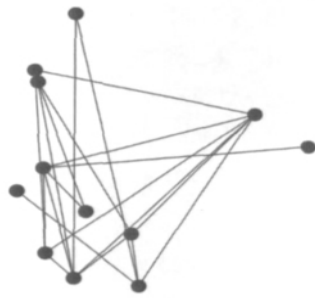


图 10 长株潭城市群市县城市交通网络

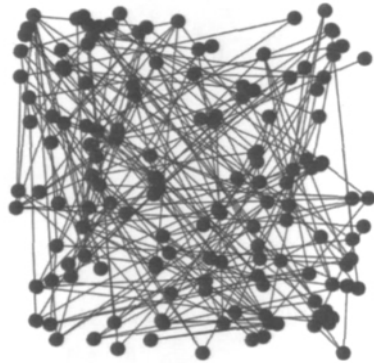


图 11 长株潭城市群城镇交通网

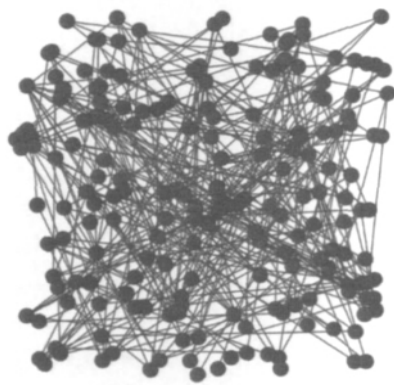


图 12 长株潭城市群城镇乡交通网

4 长株潭城市群城镇交通网络计算结果及分析

4.1 长株潭城市群城镇交通网络计算及结果

根据长沙城镇交通网络、株洲城镇交通网络、湘潭城镇交通网络、长株潭城市群市县城市交通网络、长株潭城市群城镇交通网、长株潭城市群城镇乡交通网数据,使用 Matlab 和 VC++6.0 计算六个城镇交通网络相关统计指标,如表 2 所示。

4.2 城市群城镇交通网络特性对比分析

根据表 2 中的结果,对长沙城镇交通网络、株洲城镇交通网络、湘潭城镇交通网络、长株潭城市群市县城市交通网络、长株潭城市群城镇交通网、长株潭城市群城镇乡交通网特性进行如下分析。

(1)从表 2 和图 13 中可以看出,六个城镇交通网络的直径和平均最短路径都随着城镇网络的规模变大而变大,但是城镇节点的规模变化较大,网络直径和平均最短路径变化较小,这主要受城镇分布较为均匀和城镇之间联系较少客观条件影响。六个城市群城镇网络的聚集系数都比较大,而平均最短路径也较大,因而六个城市群城镇网络具有小世界性。

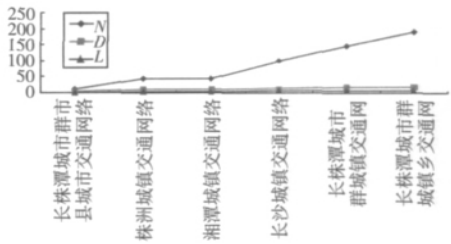


图 13 城市群城镇交通网络节点、直径、平均最短路径

表 2 长株潭城市群城镇交通网络基本特性值

| 城市群城镇交通网       | $N$          | $\langle k \rangle$ | $p$          | $C$            | $C(2)$   | $D$           | $L$          |
|----------------|--------------|---------------------|--------------|----------------|----------|---------------|--------------|
| 长沙城镇交通网络       | 102          | 3.137               | 0.031        | 0.328          | 0.045 37 | 15            | 6.198 4      |
| 株洲城镇交通网络       | 44           | 2.455               | 0.057        | 0.126          | 0.026 46 | 11            | 4.826 6      |
| 湘潭城镇交通网络       | 47           | 2.468               | 0.054        | 0.140          | 0.049 79 | 12            | 5.350 6      |
| 长株潭城市群市县城市交通网络 | 12           | 3.333               | 0.303        | 0.308          | 0.118 82 | 4             | 1.985        |
| 长株潭城市群城镇交通网    | 147          | 2.861               | 0.019        | 0.203          | 0.002 97 | 19            | 7.611 1      |
| 长株潭城市群城镇乡交通网   | 193          | 2.984               | 0.016        | 0.225          | 0.026 53 | 19            | 7.510 6      |
| 城市群城镇交通网       | $C_{random}$ | $C/C_{random}$      | $L_{random}$ | $L/L_{random}$ | $S$      | $S/N$         | $E_{global}$ |
| 长沙城镇交通网络       | 0.017        | 19.294 12           | 3.641 0      | 1.702 389 453  | 11.181 3 | 0.109 620 588 | 0.108 221    |
| 株洲城镇交通网络       | 0.017        | 7.411 765           | 4.446 9      | 1.085 385 325  | 6.668 3  | 0.151 552 273 | 0.134 949    |
| 湘潭城镇交通网络       | 0.041        | 3.414 634           | 4.375 6      | 1.222 826 584  | 8.174 3  | 0.173 921 277 | 0.124 226    |
| 长株潭城市群市县城市交通网络 | 0.125        | 2.464 000           | 1.909 0      | 1.039 811 42   | 1.998 8  | 0.166 566 667 | 0.256 410    |
| 长株潭城市群城镇交通网    | 0.011        | 18.454 55           | 4.759 3      | 1.599 205 766  | 10.473 2 | 0.071 246 259 | 0.101 969    |
| 长株潭城市群城镇乡交通网   | 0.027        | 8.333 333           | 4.664 2      | 1.610 265 426  | 16.578 1 | 0.085 896 891 | 0.086 395    |

(2)六个城市群城镇交通网络的平均度都很小,平均每个城镇只与其邻近的二或三个城镇直接相连,这说明城镇交通网连通性和整体性较差,且较大城镇与周边城镇联系较多,较小城镇与周边城镇联系较少,最少的只与邻近的一个城镇联系。其中长沙城镇交通网络和长株潭城市群市县交通网络的平均度最大分别为 3.137 和 3.333,表明其城市与城镇之间的连通性和整体性最好,城市与城镇交流较多,经济联系较强。

(3)网络密度是表示复杂网络疏密程度的重要指标,数值越大表示复杂网络越稠密;反之,相对较稀松。城市群城镇交通网络的网络密度如图 14 所示,三个城市群城镇交通网络中,网络稠密程度依次是湘潭城镇交通网络为 0.054,株洲城镇交通网络为 0.057,长沙城镇交通网络为 0.031。可以看出三个城市群城镇交通网络密度与城镇规模有非明显反向的关系。三个城市群不同级别城镇网络中,网络稠密程度为:长株潭城市群市县城市交通网络为 0.303,长株潭城市群城镇交通网为 0.019,长株潭城市群城镇乡交通网为 0.016。可以看出三个城市群不同级别的城镇交通网络与城镇级别和城镇规模有明显反向的关系。六个交通网络中长株潭城市群市县城市交通网络最大为 0.303,表明市县一级城市之间网络稠密、联系紧密。

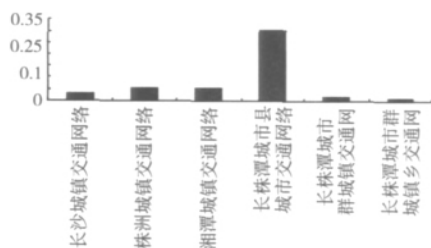


图 14 城市群城镇交通网络网络密度

(4)网络结构熵可以表征各个城市群复杂交通网络的有序性,数值越小表明该复杂网络越有序,根据表 2 和图 15 所示,在六个城市群城镇交通网络结构熵中,长株潭城市群城镇交通网数值最小,为 0.071 246 259,表明其网络最有序,湘潭城镇交通网络值最大,为 0.173 921 277,表明其网络最无序。

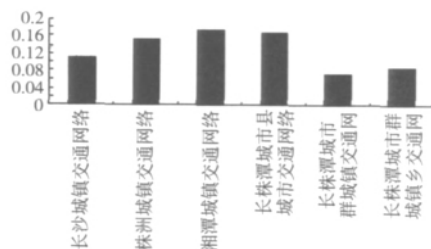


图 15 城市群城镇交通网络结构熵

(5)从表 2 和图 16 中可以看出,三个城市群城镇交通网络中,全局效率最高的是株洲城镇交通网络,为 0.134 949,长沙城镇交通网络全局效率最小,为 0.108 221。三个城市群不同级别城镇网络中,全局效率长株潭城市群市县城市交通网络为 0.256 410,长株潭城市群城镇交通网为 0.101 969,长株潭城市群城镇乡交通网为 0.086 395。其中,长株潭城市群市县城市交通网络整体效率最高。

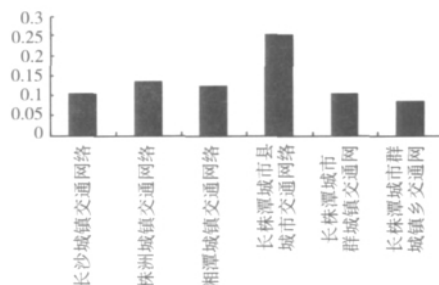


图 16 城市群城镇交通网络全局效率

(6)六个城镇交通网络城镇的度  $k$  与该度道路数  $n(k)$  的关系如图 17 所示,可以知道它们不具有无标度性特征。从图 17 中可以看出,只有少数道路的连通度较大,绝大多数道路连通度较小,这可以说明六个城镇交通网络不是无标度网络。

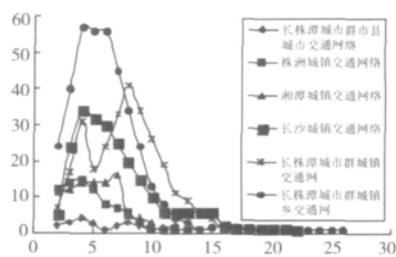


图 17 城市群城镇交通网络  $k$  与  $n(k)$  关系

#### 4.3 城市群城镇交通网络小世界特性分析

为了更好地认识长沙城镇交通网络、株洲城镇交通网络、湘潭城镇交通网络、长株潭城市群市县城市交通网络、长株潭城市群城镇交通网、长株潭城市群城镇乡交通网的拓扑特性,通过 Pajek 构建一个规模相等的 ER 随机网络。ER 随机网络是由埃尔多什和雷尼共同研究的一种典型的随机网络构造方式,这个 ER 随机网络构造的条件是具有相同的节点数和相同的平均度。然后,再求出六个城市群城镇交通网络同等规模条件的随机网络的聚集系数和平均最短路径,并使之与六个城市群城镇交通网络的聚集系数和平均最短路径对比,以发现其是否具有明显的小世界特性。在 Pajek 中,以表 3 中的节点数和平均最短路径为标准,就可以生成六个无向的 ER 随机网络。

表 3 城市群城镇交通网络的节点数与平均度

| 城市群名称          | 节点数 | 平均度   |
|----------------|-----|-------|
| 长沙城镇交通网络       | 102 | 3.137 |
| 株洲城镇交通网络       | 44  | 2.455 |
| 湘潭城镇交通网络       | 47  | 2.468 |
| 长株潭城市群市县城市交通网络 | 12  | 3.333 |
| 长株潭城市群城镇交通网    | 147 | 2.861 |
| 长株潭城市群城镇乡交通网   | 193 | 2.984 |

通过以上构建 ER 随机网络的方法可以画出 ER 随机网络图,分别如图 18~图 23 所示。

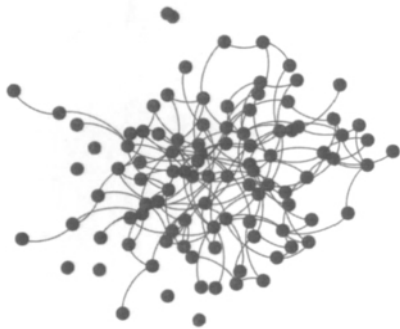


图 18 长沙城镇交通网络 ER 随机网络



图 19 株洲城镇交通网络 ER 随机网络



图 20 湘潭城镇交通网络 ER 随机网络



图 21 长株潭城市群市县交通网络 ER 随机网络

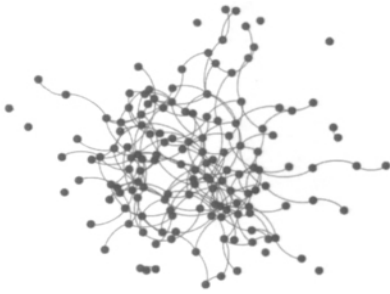


图 22 长株潭城市群城镇交通网 ER 随机网络

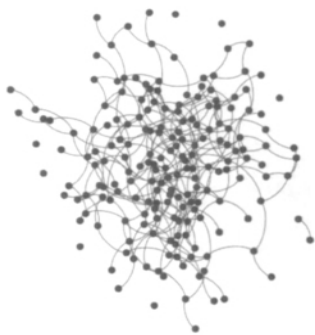


图 23 长株潭城市群城镇乡交通网 ER 随机网络

随机网络的平均最短路径  $L_{\text{random}}$  和聚类系数  $C_{\text{random}}$  分别是  $\ln n / \ln k$  和  $k / n$  的等量,在数据处理时,可以看作相同量,这种处理方式不会影响判断的最终结果<sup>[10]</sup>。因此,有如下关系:

$$L_{\text{random}} = \ln n / \ln k$$

$$C_{\text{random}} = k / n$$

六个城市群城镇交通网络拓扑参数对比表如表 4 所示。

如果网络同时兼具较小的平均最短路径长度和较大的聚类系数<sup>[10]</sup>,这样的网络就绝对具备小世界网络的特性。公式表达为: $L \geq L_{\text{random}}, C \gg C_{\text{random}}$ ,反之就不具备小世界网络特性。

从图 24~图 25 中可以看出,六个城市群城镇交通网络的平均路径与六个城市群城镇交通网络 ER 随机网络的平均路径相差不多,都是前者大于后者,如长沙城镇交通网络平均最短路径实际值就比 ER 随机网络平均最短路径值大 2.557 4。但是,六个城市群交通网络的聚集系数远远大于 ER 随机网络的聚集系数,如长沙城镇交通网络聚类系数实际值就比 ER 随机网络聚类系数值大 0.311,这就更加准确地表明城市群交通网络具有典型的小世界特性。

4.4 城市群城镇交通网络无标度特性分析

根据城市群交通网络度和累计度分布制作散点图,并用拟合的方法来判断城市群城镇交通网络是否具有无标度性,如果双对数曲线呈直线,拟合方程是幂函数,则具有无标度性,反之,则不具有无

表4 六个城市群城镇交通网络拓扑参数

| 城市群名称          | 节点数 | 平均度   | 聚集系数  | 聚集系数实际值与ER网络差值 | 平均最短路径  | 平均最短路径实际值与ER网络差值 |
|----------------|-----|-------|-------|----------------|---------|------------------|
| 长沙城镇交通网络       | 102 | 3.137 | 0.328 |                | 6.198 4 |                  |
| ER 网络          | 102 | 3.137 | 0.017 | 0.311          | 3.641 0 | 2.557 4          |
| 株洲城镇交通网络       | 44  | 2.455 | 0.126 |                | 4.826 6 |                  |
| ER 网络          | 44  | 2.455 | 0.017 | 0.109          | 4.446 9 | 0.379 7          |
| 湘潭城镇交通网络       | 47  | 2.468 | 0.140 |                | 5.350 6 |                  |
| ER 网络          | 47  | 2.468 | 0.041 | 0.099          | 4.375 6 | 0.975 0          |
| 长株潭城市群市县城市交通网络 | 12  | 3.333 | 0.308 |                | 1.9850  |                  |
| ER 网络          | 12  | 3.333 | 0.125 | 0.183          | 1.909 0 | 0.067 0          |
| 长株潭城市群城镇交通网    | 147 | 2.861 | 0.203 |                | 7.611 1 |                  |
| ER 网络          | 147 | 2.861 | 0.011 | 0.192          | 4.759 3 | 2.851 8          |
| 长株潭城市群城镇乡交通网   | 193 | 2.984 | 0.225 |                | 7.510 6 |                  |
| ER 网络          | 193 | 2.984 | 0.027 | 0.198          | 4.664 2 | 2.846 4          |

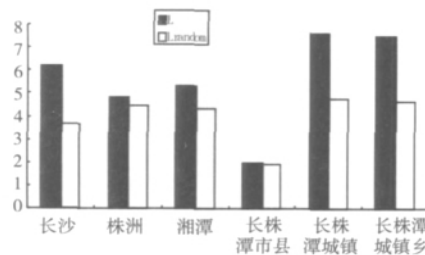


图24 城市群城镇交通网络平均最短路径与ER随机网络平均最短路径比较图

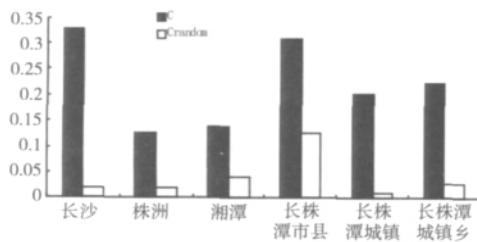


图25 城市群城镇交通网络聚集系数与其ER随机网络聚集系数比较图

标度性。通过双对数图和拟合方程可以发现，六个城市群城镇交通网络都不具有无标度性，不是无标度网络，如图26~图31所示。

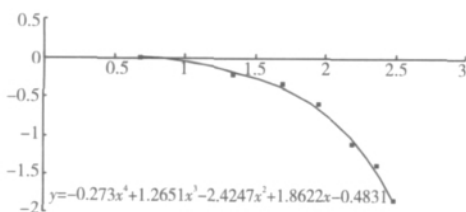


图26 长株潭城市群市县城市交通网络双对数图及拟合曲线

通过以上拟合曲线，可以得到曲线相对应的方程，这六条曲线对应的方程为 ( $x = \log(k)$ ),  $y =$

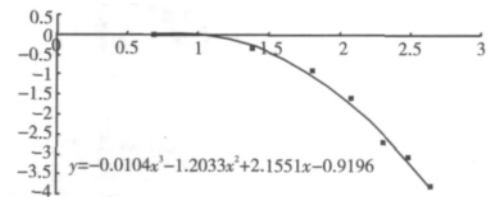


图27 株洲城镇交通网络双对数图及拟合曲线

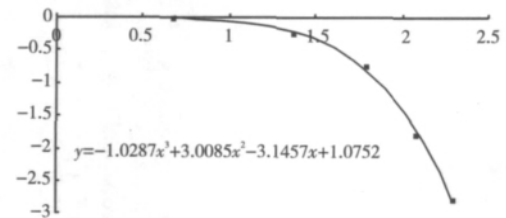


图28 湘潭城镇交通网络双对数图及拟合曲线

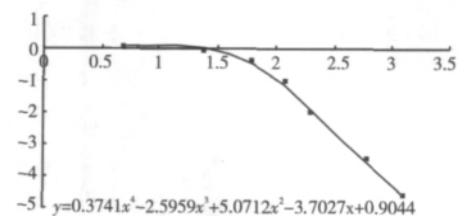
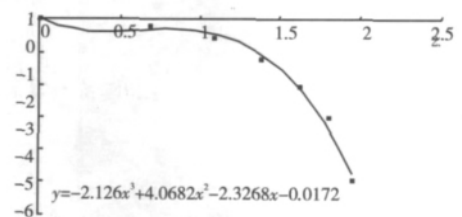


图29 长沙城镇交通网络双对数图及拟合曲线

图30 长株潭城市群城镇交通网双对数图及拟合曲线  $\log p(k)$  :

$$y = -0.273x^4 + 1.2651x^3 - 2.4247x^2 + 1.8622x - 0.4831$$

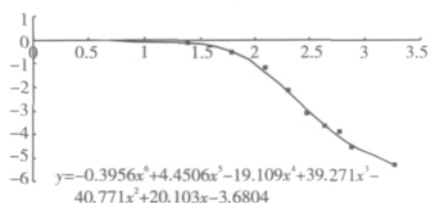


图 31 长株潭城市群城镇乡交通网双对数图及拟合曲线

$$y = -0.0104x^3 - 1.2033x^2 + 2.1551x - 0.9196$$

$$y = -1.0287x^3 + 3.0085x^2 - 3.1457x + 1.0752$$

$$y = 0.3741x^4 - 2.5959x^3 + 5.0712x^2 - 3.7027x + 0.9044$$

$$y = -2.126x^3 + 4.0682x^2 - 2.3268x - 0.0172$$

$$y = -0.3956x^6 + 4.4506x^5 - 19.109x^4 + 39.271x^3 - 40.771x^2 + 20.103x - 3.6804$$

从图 26~图 31 中可以看出,这些方程都非常好地拟合了所对应的散点图,而这些方程不具有幂律特性,从而可以判断六个城市群城镇交通网络不存在无标度特性,不是无标度网络。

#### 4.5 城市群城镇交通网络随机特性分析

根据城市群交通网络度和累计度分布制作散点图,并采用拟合的方法来判断城市群城镇交通网络是否具有随机性,通过半对数图和拟合方程可以发现六个城市群城镇交通网络都不具有随机性,不是随机网络,如图 31~图 36 所示。

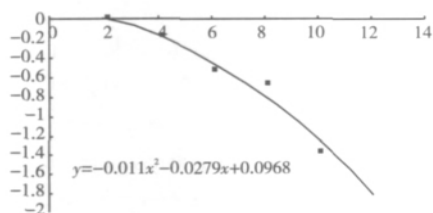


图 31 长株潭城市群市县级城市交通网络半对数图及拟合曲线

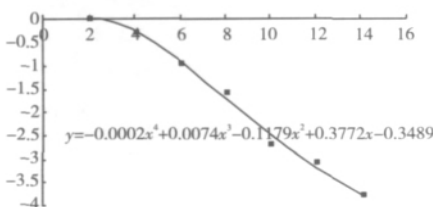


图 32 株洲城镇交通网络半对数图及拟合曲线

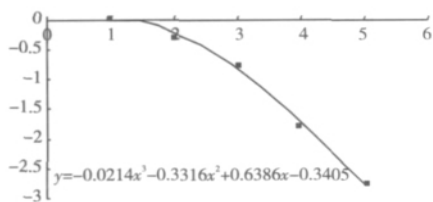


图 33 湘潭城镇交通网络半对数图及拟合曲线

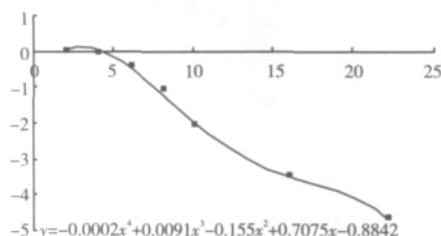


图 34 长沙城镇交通网络半对数图及拟合曲线

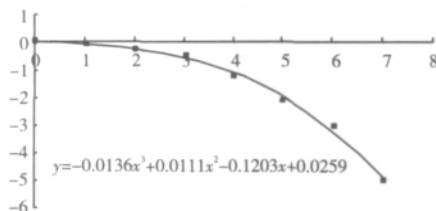


图 35 长株潭城市群城镇交通网半对数图及拟合曲线

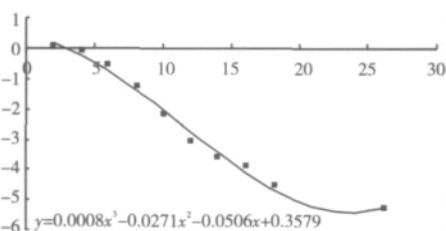


图 36 长株潭城市群城镇乡交通网半对数图及拟合曲线

通过以上拟合曲线,可以得到曲线相对应的方程,这六条曲线对应的方程为:

$$y = -0.011x^2 - 0.0279x + 0.0968$$

$$y = -0.0002x^4 + 0.0074x^3 - 0.1179x^2 + 0.3772x - 0.3489$$

$$y = 0.0214x^3 - 0.3316x^2 + 0.6386x - 0.3405$$

$$y = -0.0002x^4 + 0.0091x^3 - 0.155x^2 + 0.7075x - 0.8842$$

$$y = -0.0136x^3 + 0.0111x^2 - 0.1203x + 0.0259$$

$$y = 0.0008x^3 - 0.0271x^2 - 0.0506x + 0.3579$$

从图 31~图 36 中可以看出,这些方程都非常好地拟合了所对应的散点图,而这些方程不具有随机性,从而可以判断六个城市群城镇交通网络不是随机网络。

## 5 结束语

通过对长沙城镇交通网络、株洲城镇交通网络、湘潭城镇交通网络、长株潭城市群市县级城市交通网络、长株潭城市群城镇交通网、长株潭城市群城镇乡交通网的平均度、网络密度、 $n$ -聚集系数、平均最短路径、随机网络聚集系数等网络特性指标的计算和分析,可以从全局把握城市群城镇交通网络

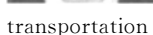
的连通状况,根据网络的整体连通状况对城镇交通网络进行优化调整;城市群城镇交通网络都具有小世界性,说明城市群城镇交通网络平均最短路径并不是随着规模的增大而增大,而是具有较小的平均最短路径,这表明任何两个城市群城镇交通网络中城市、城镇相互联系十分紧密;城市群城镇交通网络都不具有无标度性,不是无标度网络,这可以初步说明其稳定性、鲁棒性不强,这说明对城镇道路维护就相对较为重要,否则将对城镇发展有重要影响;对城市群城镇交通网络的研究为城市群城镇交通网络演化动态研究提供约束条件。

#### 参考文献:

- [1] Sen P, Dasgupta S, Chatterjee A. Small-World Properties of the Indian Railway Network[J]. Physical Review E, 2003, 67 (3):036106.
- [2] 刘锐, 严宝杰, 黄志鹏. 城市公共交通网络的复杂性分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2009, 9(3):17-22.
- [3] 张译, 靳雪翔, 张毅, 等. 基于二分图的城市公交网络拓扑性质研究[J]. 系统工程理论与实践, 2007, 27(7):149-155.
- [4] Xu X P, Hu J H, Liu F, et al. Scaling and Correlations in Three Bus Transport Networks of China [J]. Physica A (S0378-4371), 2007, 374(1):441-448.
- [5] Sienkiewicz J, Holyst J A. Statistical Analysis of 22 Public Transport Networks in Poland[J]. Physical Review E, 2005, 72(4):046127.
- [6] Wu J J, Gao Z Y, Su H J, et al. Urban Transit System as a Scale-Free Network[J]. Modern Physics Letter B (S0217-9849), 2004, 18(19-20):1043-1049.
- [7] Porta S, Cnicitti P, Latora V. The Network Analysis of urban Streets: A Primal Approach[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 2006, 33(5):705-725.
- [8] Cardillo A, Scellato S, Latora V. Centrality Measures in Spatial Networks of Urban Streets[J]. Physical Review E, 2006, 73(3):036125.
- [9] Porta S, Cnicitti P, Latora V. The Network Analysis of Urban Streets: A Dual Approach[J]. Physical A, 2006, 369:853-866.
- [10] Watts D J, Strogatz S H. Collective Dynamics of Small-World Network[J]. Nature, 1998, 393 (4):440-442.



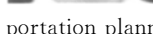
王国明(1980-),男,辽宁义县人,博士生,研究方向为交通运输规划与管理。  
E-mail: wwgmm@126.com



**WANG Guo-ming**, born in 1980, PhD candidate, his research interests include transportation planning and management.



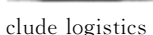
李夏苗(1963-),男,湖南茶陵人,博士,教授,研究方向为交通运输规划与管理。E-mail: xmli@csu.edu.cn



**LI Xia-miao**, born in 1963, PhD, professor, his research interests include transportation planning and management.



杨波(1972-),男,湖南望城人,博士生,工程师,研究方向为物流工程与管理。E-mail: Yangbo\_8080@126.com



**YANG Bo**, born in 1972, PhD candidate, engineer, his research interests include logistics engineering and management.



胡正东(1975-),男,湖南衡阳人,博士生,副教授,研究方向为物流工程与管理。E-mail: zhengdonghu@163.com



**HU Zheng-dong**, born in 1975, PhD candidate, associate professor, his research interests include logistics engineering and management.