

文章编号:1001-4098(2012)05-0081-08

# 城市群交通网络层级结构与组团结构识别<sup>\*</sup>

李夏苗<sup>1</sup>, 王国明<sup>1</sup>, 胡正东<sup>1,2</sup>, 杨波<sup>1</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)

**摘要:**为了深入研究城市群交通网络层次结构与组团结构,本文建立复杂网络层级结构和组团结构识别算法,并以长株潭城市群交通网络为例划分城市群交通网络的层级结构与组团结构。通过对长株潭城市群交通网络的层次结构与组团结构的研究可以得出以下几个重要结论:(1)层级结构和组团结构并不是孤立,二者同时存在的。(2)复杂网络的层次结构和组团结构算法能够有效地、准确地划分城市群层级结构与组团结构。(3)河流等自然地理条件对城市交通网络连通性和交通网络中的层次结构和组团结构有至关重要的影响。

**关键词:**复杂网络;交通网络;层级结构;组团结构

**中图分类号:**U 113 **文献标识码:**A

## 1 引言

复杂网络存在着层级结构和组团结构,复杂网络可以在不同的尺度上划分成为不同的组团,也可以划分为不同的层级结构<sup>[1]</sup>,探究复杂网络的层级结构与组团结构对理解复杂网络安全、复杂网络结构具有极其重要的意义。

网络存在着层级结构,层级结构是复杂网络的中心组织原则<sup>[1]</sup>,聚集系数和度之间存在的这种标度律量化了节点的聚集程度差异和层级性的共存性,可以用来证明现实网络中的层级组织<sup>[2]</sup>。其中,演员合作网络<sup>[3]</sup>和万维网<sup>[4]</sup>具有相同的标度律为-1, AS 层级的Internet 网络满足标度律为-0.75<sup>[5]</sup>,随机网络和BA 无标度网络不具有层级结构<sup>[6]</sup>。

网络存在着组团结构,在许多网络中,节点间联系并不相同,有些密集有些稀松,联系紧密的地方就形成了组团,而整个网络就由这些组团构成。组团结构已经在很多网络中发现如社会网络<sup>[7-8]</sup>、代谢网络<sup>[9]</sup>、世界航班网络、生物网络和电路网<sup>[10-12]</sup>。识别网络组团结构的方法有很多,主要分为两大类:一类是图形分割的方法;另一类是分级聚类的方法,具体方法有 Kernighan-Lin 算法<sup>[13]</sup>、谱平均法<sup>[14]</sup>、NOMAL 矩阵谱平均算法<sup>[15]</sup>、GN 分裂算

法<sup>[15,16-18]</sup>、堆结构算法<sup>[19]</sup>等。

目前,国内外的学者都把网络层级结构和组团结构作为单个网络结构特性进行研究,然而层级结构和组团结构并不是孤立,二者同时存在的。从纵向来看,整个网络中的节点可以划分成不同的层级,从横向来看,整个网络划分成不同尺度的组团。现在网络层次结构和组团结构没有统一起来,也没有将其应用到交通网络方面的研究。因而,本文建立复杂网络层级结构和组团结构算法,并以长株潭城市群交通网络为例辨识其交通网络的层级结构与组团结构。

## 2 网络层级结构和组团结构识别的一种新算法

网络层级结构和组团结构存在于复杂网络之中,网络的每一个节点在网络中的地位和结构作用是不相同的,所以,网络中的一部分节点是连接两个聚集更紧密的组团,这些节点成为两个组团的桥梁和纽带,因而其在保证整个网络连通中起着更为重要的作用,通过去除网络中的某些重要的节点,把网络在不同尺度上破碎成为更小的组团,而这些去掉节点就成为不同的层级,在不断的破碎中,最终使每个节点都成为孤立的节点,而在整个过程中,从纵

\* 收稿日期:2011-12-24; 修订日期:2012-02-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71071165)

作者简介:李夏苗(1963-)男,湖南茶陵人,中南大学交通运输工程学院副院长,教授,博士生导师,研究方向:交通运输系统分析,铁路运输管理等;王国明(1980-)男,满族,辽宁锦州人,中南大学交通运输学院博士研究生,研究方向:交通运输规划与管理,产业经济学等;胡正东(1975-)男,湖南衡阳人,南华大学副教授,中南大学交通运输学院博士研究生,研究方向:物流规划与管理;杨波(1972-)男,湖南望城人,中南大学交通运输学院博士研究生,研究方向:物流规划与管理等。

向来看,将整个网络中的点划分成不同的层级,从横向来看,将整个网络划分成不同尺度的组团,因而,可以把网络的组团结构和层级结构同时划分出来的。

在以前的研究中,对组团的划分方法很多,但没有把层级结构和组团结构同时划分出来的方法。本文建立了一种新的算法称为点介数分割法。这种方法先寻找可以把整个网络划分成组团的节点,然后,去掉节点,同时去掉与之相连接的所有边。通过不断重复,我们可以把社区划分的越来越小,最后,一个节点成为一个组团。然而,在算法中去除第一个节点后,整个网络中的节点介数将发生变化,为使之准确,在去除节点后,需要重新计算点介数值,否则,将影响组团结构和层级结果的划分。因而,去除一个节点,再次计算除去此节点的网络中节点的介数数值,然后,重复此步骤。

因此,组团结构和层级结构识别方法一般的算法:

- ① 计算网络中所有点介数值。
- ② 找到点介数值最高的点,并移除此点。
- ③ 重新计算移除后的余下的所有点的介数值。

- ④ 直到出现新的组团之前移除的点形成一个层级。
- ⑤ 重复步骤②。

其中,节点的介数数值的算法采用费瑞曼点介数(Freeman node betweenness)算法。

在测量某一点的介数时,需要考虑网络中任意两个节点之间的最短路径数量和经过该点的最短路径数量。如果两个节点之间有一条最短路径,并且经过该点,那我们就认为该点的介数为1。如果节点之间有 $n$ 条最短路径,且只 $m$ 条经过该点,就认为该点的介数值为 $m/n$ 。因此,公式为

$$NB = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n \frac{g_{jk}(i)}{g_{jk}}, \quad j \neq k \neq i \text{ 且 } j < k$$

式中:  $NB$  为  $i$  节点的绝对介数;  $i, j, k$  为节点;  $g_{jk}(i)$  为点  $j$  和点  $k$  之间经过点  $i$  的最短路径数目;  $g_{jk}$  为点  $j$  和点  $k$  之间的最短路径数目。

采用节点介数分割法计算后的最终结构可以做成以下样式的图形(图1)。

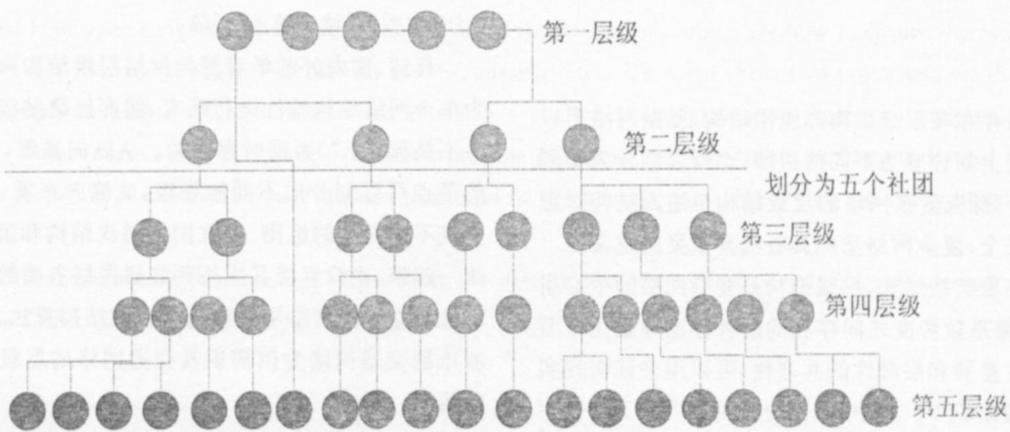


图1 不同尺度的层级结构与组团结构

从图1可以看出,整个网络是一个整体,从纵向上看,可以把网络划分为五个层级,从上向下,这些层级上的节点,对网络的整体性重要程度越来越小,从横向上看,可以在不同尺度上把网络划分为不同的组团,去掉横线上面的点,可以把网络划分为5个组团,横线向上移动,组团个数越来越少,组团成员越来越多,横线向下移动,组团个数越来越多,组团成员越来越少。

### 3 长株潭城市群交通网络的层级结构与组团结构识别

#### 3.1 长株潭城市群交通网

为了方便分析,根据百度地图,选择长株潭城市群包括长沙市区、长沙县、望城县、宁乡县、株洲市区、株洲县、

湘潭市区、湘潭县等县级及以上城市区域主要公路及城市道路所构成的交通网络作为研究对象,从长株潭城市群区域选取长潭西高速公路、万家丽路、中山路、八一路、韶山路、解放路等450条道路进行分析,这些道路的规模足以用来研究交通网络其层级结构和组团结构。(图2)

#### 3.2 长株潭城市群交通路网名对偶网

城市群交通网络进行统计分析需要将地图上交通网络抽象成网络模型,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>[20-21]</sup>,另一种就是 dual approach<sup>[22]</sup>。将道路映射为网络的节点,将道路间的交叉口映射为网络的边,构建无权、无向的交通网络。可以制成长株潭城市群交通网络对偶图(dual graph)(图3)。



图2 长株潭城市群交通网

### 3.3 长株潭城市群交通网的层级结构与组团结构识别及分析

按照网络层级结构与组团结构新算法,利用VC++6.0连接Matlab7.0进行计算,可以得到长株潭城市群交通网络节点介数数值表(表1)。

计算过程中也可以得到长株潭城市群交通网络层级

结构表(表2),每一个层级代表组团分割一次所应去掉的节点,也就是所去掉的道路。如第一层级包括京港澳高速、南二环、G107、雷锋大道、X051、枫林三路等重要的道路。逐级向下分割,直到把450条道路所构成的长株潭城市群交通网络分成一百九十一一个层级,其中最后一级将道路划分为单条道路、二条道路或者三条道路。

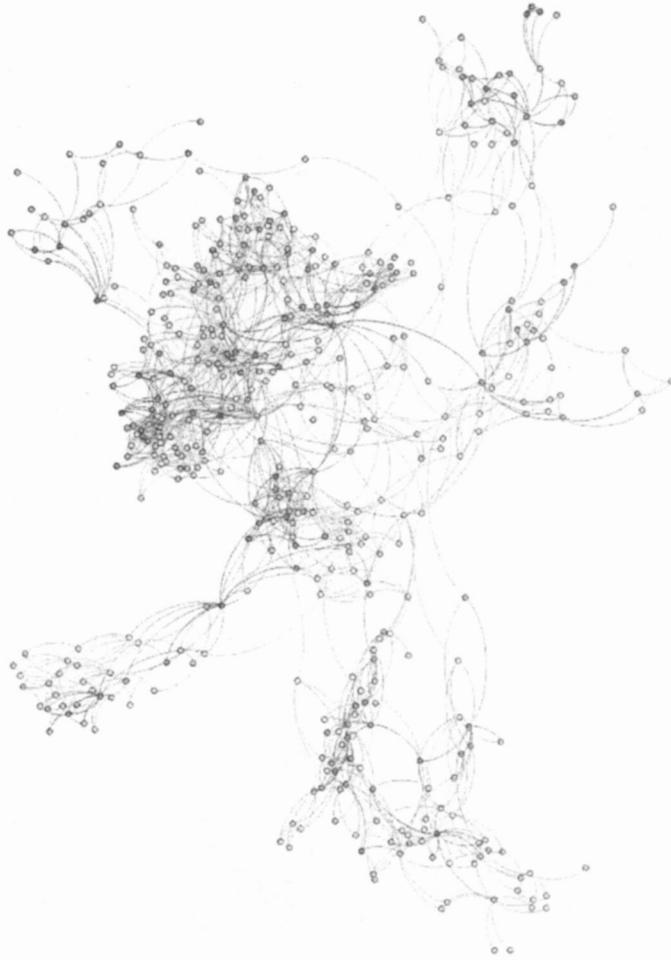


图3 城市群交通运输网络对偶图

表1 长株潭城市群交通网络节点介数数值

序号	道路名称	介数数值	序号	道路名称	介数数值	序号	道路名称	介数数值
1	京港澳高速	47509.465	151	云龙路	12.500	301	渔业路	0
2	南二环	35785.688	152	大鹏路	13.000	302	福元东路	0
3	G107	35827.996	153	德雅路	12.000	303	西凤路	0
4	雷锋大道	25747.662	154	湖湘西路	12.000	304	双拥路	0
5	X051	28887.674	155	银双路	11.000	305	金帆路	0
6	枫林三路	48193.516	156	白沙路	10.667	306	开福寺路	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...
145	滨湖东路	13.667	295	芦淞路2	0	445	芙蓉大道	0
146	望仙路	16.617	296	泰山路2	0	446	XB05	0
147	开元中路	26.417	297	双月路	0	447	X012	0
148	长浏高速	43.833	298	文化路	0	448	X082	0
149	东环路	13.000	299	津口路	0	449	X078	0
150	谷月路	12.824	300	学堂路	0	450	X075	0

表2 长株潭城市群交通网络层级结构

级别	道路
第一层级	京港澳高速、南二环、G107、雷锋大道、X051、枫林三路
第二层级	金星大道、银杉路
第三层级	万家丽路、东二环、三一大道、远大路、人民东路、红旗路、芙蓉北路、高家坡路、后湖路、湘江北路、双河路
第四层级	沪昆高速、天易公路
第五层级	太子路
第六层级	东湖路、锦绣路、金马路
第七层级	新华西路、红港路、芦淞路、衡山路、建设南路
第八层级	吉安路
...	...
第一百九十一层级	长江路、普兰特路、陈渔路、山月路、书院路、南湖路、桔园路、黄兴南路、香樟东路、洪山路、蔡锷南路、福元西路、谷丰路、银盆南路、银盆南路2、清水路、丰顺路、劳动东路、潭白路、大河路、泉坝路、科教路、杉木路、黄元路、桐西路、滨江景观道等226条道路

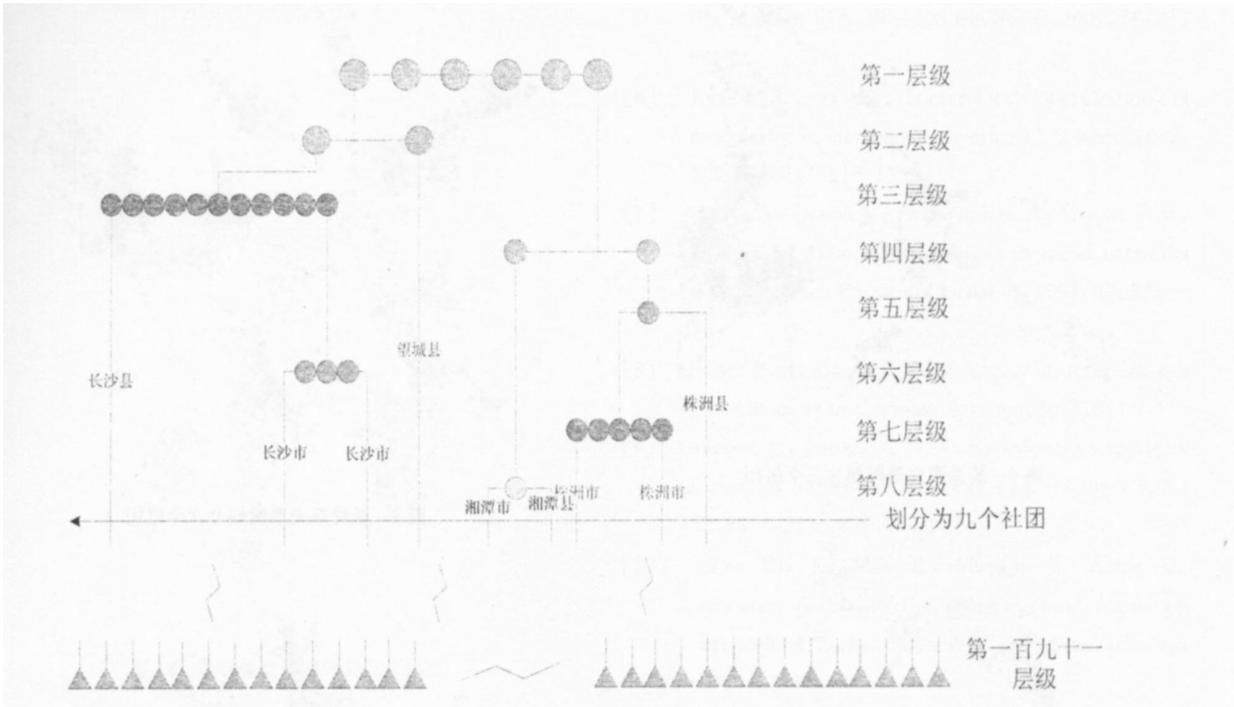


图4 长株潭城市群交通网络层级结构与组团结构

根据上面的计算结果和长株潭城市群交通网络层级结构制作长株潭城市群交通网络层级结构与组团结构图(图4),其中第二次出的组团将望城县分割出来。第三次将长沙县和长沙市分割出来,第五次将株洲县和株洲市分割出来。第八次把湘潭市与湘潭县分割开来。

根据长株潭城市群交通网络层级结构与组团结构分割次序,所绘制出来的,长株潭城市群交通网络组团结构,本文只绘出从二个组团到九个组团的分割图(图5至图12),它们是在不同层级情况下分割出来的。

人们会发现长株潭城市群中所选取的七个城市都已经划分出来,却分成九个组团(图12),这是因为湘江经过长株潭三个城市。长沙市、株洲市都被河流所分割,二个城市都分成河东和河西两个部分。例如株洲,泰山路、黄山路、长江东路、长江北路、普兰特路、长江南路、衡山路等是河西城区的道路,而人民南路、华南路、钻石路、茨塘路、文化路、合泰大街、石宋路、公园路、体育路等是河东城区的道路。这表明河流等自然条件对城市交通络连通性和交通网络中的层次结构和组团结构有至关重要影响。



图5 长株潭交通网划分二个组团



图8 长株潭交通网划分五个组团



图6 长株潭交通网划分三个组团



图9 长株潭交通网划分六个组团

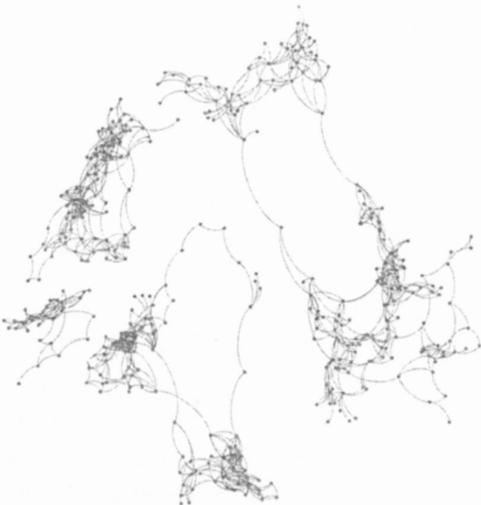


图7 长株潭交通网划分四个组团

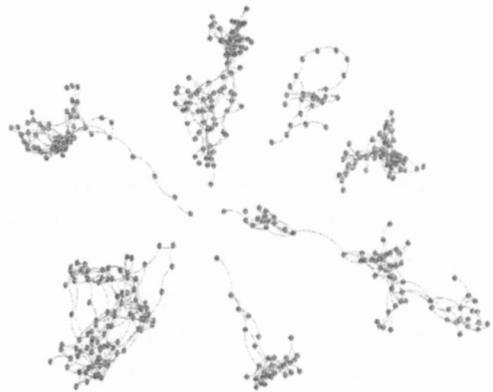


图10 长株潭交通网划分七个组团



图 11 长株潭交通网划分八个组团

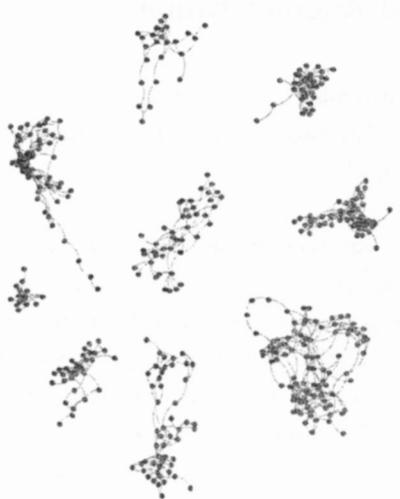


图 12 长株潭交通网划分九个组团

## 4 结论

复杂网络存在着层级结构和组团结构,复杂网络可以在不同的尺度上划分成为不同的组团,也可以划分为不同的层级结构,然而层级结构和组团结构并不是孤立,二者同时存在的,从纵向来看,将整个网络中的节点划分成不同的层级,从横向来看,将整个网络划分成不同尺度的组团。通过对长株潭城市群交通网络的层次结构与组团结构的研究表明,复杂网络的层次结构和组团结构算法划分的长株潭城市群交通网络的层次结构与组团结构是与实际的长株潭城市群交通网络状况相符合的。

## 参考文献:

- [1] Clauset A, et al. Hierarchical structure and the prediction of missing links in networks [J]. *Nature*, 2008, 453: 98~101.
- [2] Ravasz E, Barabási A L. Hierarchical organization! in complex networks [J]. *Physical Review E*, 2003, 67(2): 26112.
- [3] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of small-world networks [J]. *Nature*, 1998, 393(6684): 440~442.
- [4] Eckmann J P, Moses E. Curvature of co-links uncovers hidden thematic layers in the world wide web [C]//Proceedings of the National Academy of Sciences, 2002, 99(9): 5825~5829.
- [5] Vázquez A, Pastor-Satorras R, Vespignani A. Large-scale topological and dynamical properties of the internet [J]. *Physical Review E*, 2002, 65(6): 66130.
- [6] Ravasz E, et al. Hierarchical organization of modularity in metabolic networks [J]. *Science*, 2002, 297(5586): 1551~1555.
- [7] Arenas A, Danon L, Díaz-Guilera A, Gleiser P M, Guimerà R. Community analysis in social networks [J]. *European Physical Journal B*, 2004, 38: 373~380.
- [8] Gleiser P M, Danon L. Community structure in jazz [J]. *Advances in Complex Systems*, 2003, 6(4).
- [9] Guimerà R, Amaral L A N. Functional cartography of complex metabolic networks [J]. *Nature*, 2005, 433: 895~900.
- [10] Shen Orr S, Milo R, Mangan S, Alaon U. Network motifs in the transcriptional regulation network of *Escherichia coli* [J]. *Nature Genetics*, 2002, 31: 64.
- [11] Milo R, Shen Orr S, Alaon U. Network motifs: Simple building blocks of complex networks [J]. *Science*, 2002, 298: 824.
- [12] Holme P, Huss M J, Eong H. Subnetwork hierarchies of biochemical pathways [J]. *Bioinformatics*, 2003, 19: 532~538.
- [13] Kernighan B W, Lin S. A efficient heuristic procedure for partitioning graphs [J]. *Bell System Technical Journal*, 1970, 49: 291~307.
- [14] Pothen A, Simon H, Liou K P. Partitioning sparse matrices with eigenvectors of graphs [J].

- SISMJ·Matrix Anal·Appl, 1998, 11, 430~432.
- [15] Capocci A, Servedio V D P, Caldarelli G, Colaiori F. Detecting communities in large networks [J]. Computer Science, 2004, 3243: 181~187.
- [16] Wildinson D, Huberman B. A method for finding communities of related genes [J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2004, 11: 5241~5248.
- [17] Tyler J, Wilkinson D, Huberman B. Email as spectroscopy: Automated discovery of community structure within organizations [C]//International Conference on Communities and Technologies, 2003: 81~96.
- [18] Arenas A, Danon L, Diaz-Guilera A, Gleiser P M, Guimera R. Community analysis in social networks [J]. Eur·Phys·J·B, 2004, 38: 373~380.
- [19] Dnetti L, Munoz M A. Detecting network communities: A new systematic and efficient algorithm [J]. Stat·Mech·Theor·Exp., 2004: 10012.
- [20] 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.
- [21] Cardillo A, Scellato S, Latom V, Pona S. Centrality measures in spatial networks of urban Streets [J]. Physical Review, 2006, 73(036125).
- [22] Porta S, Cmcitti P, Latora V. The network analysis of urban streets: A dual approach [J]. Physical A, 2006, 369: 853~866.

## Identifying Hierarchical Structure and Community Structure of the Traffic Networks of Urban Agglomeration

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

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

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

**Abstract:** In order to research hierarchical structure and community structure of the traffic networks of urban agglomeration, this paper builds the identification algorithm of hierarchical structure and community structure of complex network, which is used to analyze the hierarchical structure and community structure of the traffic networks of Chang-Zu-Tan urban agglomeration. The conclusions demonstrate that: (1) the hierarchical structure and community structure of the traffic networks of urban agglomeration are not isolated, instead both exist simultaneously; (2) the identification algorithm of hierarchical structure and community structure of complex network is effective and accurate; (3) rivers and other natural and geographical conditions have impacts on the connectivity the traffic networks of urban agglomeration connectivity.

**Key words:** Complex Network; Traffic Network; Hierarchical Structure; Community Structure