

文章编号: 1009-6744 (2013) 01-0193-06

## 330 个中国城市 P 空间下公交复杂网络实证研究

许 晴, 祖正虎, 徐致靖, 张文斗, 郑 涛\*

(北京生物工程研究所, 北京 100071)

**摘要:** 目前针对中国城市公交复杂网络的实证研究仍然仅限于数个大城市, 而对不同规模城市的公交网络在拓扑结构上是否存在不依赖于人口、社会、经济等外部因素的共性特征, 以及城市公交系统演化机制的研究尚不多见. 本文实证研究了 330 个中国城市 P 空间下公交复杂网络结构特征, 发现度分布普遍呈指数分布, 表示公交网络演化机制为随机连接而非择优连接; 普遍具有较大的簇系数和较小的平均最短路径, 呈现典型的小世界特征; 网络同配性在  $N=1\ 000$  处发生相变,  $N>1\ 000$  的网络普遍正相关, 反之负相关.  $C\langle K\rangle$  与  $K$  呈幂律下降关系, 表明各城市公交网络具有等级模块性. 本文研究结果可为理解城市公交系统演化规律、交通网络建模研究提供指导和参考.

**关键词:** 城市交通; 公交复杂网络; P 空间; 实证研究; 结构共性

**中图分类号:** N945; U491.17

**文献标识码:** A

## Space P-Based Empirical Research on Public Transport Complex Networks in 330 Cities of China

XU Qing, ZU Zheng-hu, XU Zhi-jing, ZHANG Wen-dou, ZHENG Tao

(Beijing Institute of Biotechnology, Beijing 100071, China)

**Abstract:** The current empirical studies on public transport network of the cities in China are still limited to several large cities such as Beijing, Shanghai and Guangzhou. And the researches on whether the common topologies of public transport network for cities in different scales do not rely on some extend factors such as population, society or economic, and the researches on the evolutionary mechanisms of public transport network are still limited. This paper studies the public transport networks of 330 cities in China based on the space P concept. Statistical results show that the degree distribution of all networks can be described by an exponential function. It reveals that the evolution mechanism of public transport network is randomly connected instead of preferential attached. All the networks show typical small-world behaviors which characterized by larger clustering coefficient and smaller average shortest path. A transition between the dissortative small networks  $N<1000$  and assortative large networks  $N>1000$  is observed. Average clustering coefficient of nodes with degree  $K$  decreases with  $K$  as a power law, shows that city bus transfer networks are well characterized by hierarchical modularity. The results of this study may provide guidance and reference

收稿日期: 2012-07-12

修回日期: 2012-08-13

录用日期: 2012-09-03

基金项目: 国家自然科学基金(90924019); 国家科技重大专项(2013ZX10004-605).

作者简介: 许晴(1983-), 男, 江苏徐州人, 博士生.

\* 通讯作者: zt19721@hotmail.com

for researches on evolution mechanism of urban public transport systems and transport network evolution modeling.

**Key words:** urban traffic; public transport complex networks; space P; empirical research; common topological properties

**CLC number:** N945; U491.17

**Document code:** A

## 1 引言

公共交通系统是一个城市的关键基础设施,与市民的日常生活、城市的正常运转及经济发展密切相关。复杂网络的兴起,为研究城市公共交通开辟了一条新的道路。将城市公交系统抽象为复杂网络,可以从系统的高度研究公交系统的结构性及本质规律,从公交系统发展变化的过程中探索系统潜在的演化机制,是对公交系统传统研究方法的有益补充,有利于对现实公交系统的规划、管理与决策。

国内外学者从复杂网络角度对城市公共交通系统开展了大量研究。Sienkiewicz 等<sup>[1]</sup>研究了波兰 22 个城市的公共交通网络,分析了度、特征路径、簇系数等拓扑参数。Ferber 等<sup>[2]</sup>对世界上 14 个大城市的公交网络进行了实证分析。国内方面, Li Ping 等<sup>[3]</sup>对中国 10 个较大城市(成都、广州、杭州、上海、沈阳、深圳、天津、武汉、南京、北京)的公交网络进行了实证分析,发现各城市公交网络均表现出小世界特性。另外,他们研究了城市公交网络的全局与局部效率,结果表明,这十个城市公交网络局部效率很高,而全局效率很低。陆化普等<sup>[4]</sup>研究了廊坊、济宁和大连的城市公交网络。顾前等<sup>[5]</sup>对北京、上海和杭州 3 大城市公共交通网络分别在 L 空间和 P 空间映射下的网络进行了研究,发现 3 个城市的公交网络均具有较小的平均路径和较大的簇系数,即具有典型的小世界特征,这种特征在 P 空间中反映更为明显;节点度分布在 Space L 方法描述下具有无标度特性,在 Space P 方法的描述下具有指数分布特征。惠伟等<sup>[6]</sup>以上海、北京等城市的公交线路部分站点和路线为例,分别从公交站点网络、公交换乘网络和公交线路网络角度总结了城市公交网络的复杂特性,发现北京和上海的公交网络具有小世界特性,度分布都符合指数分布。

目前针对中国城市公交网络的研究还仅限于对北京、上海、广州、深圳等大城市的实证研究,尚没有同时横向对比分析大量城市公交网络拓扑结构特征的研究。本文于 2012 年 3 月 10 日获取可公

开下载的城市公交信息数据库(<http://mobile.8684.cn/download>),各城市数据库中包含该城市所有公交线路名称、始末班车时间等信息及每条公交线路上(上下行)依次经过的公交站点的名称及经纬度坐标,利用 C++ 编程解析数据库内容。考虑到部分城市公交系统规模过小(如云南路西仅有 2 条公交线路 8 个公交站点)而带来的随机性影响,本文针对公交线路达到 10 条以上的 330 个中国城市的公交信息构建公交复杂网络,覆盖了中国大陆直辖市、所有省份的省会城市及其他主要城市。各城市公交线路数量从 10 条(临沧、渭南、滁州等)到 1714 条(北京),公交站点数量从 32 个(临沧)到 9502 个(上海),公交系统规模跨度巨大。本文探讨了不同规模的城市公共交通网络在拓扑结构上不依赖于城市人口、社会、经济等外部因素的共性特征,所得结论对城市公共交通研究及公交网络演化建模具有指导和参考作用。

## 2 构建公交复杂网络

定义网络的拓扑结构是分析公交网络的前提和基础。目前,城市公交网络拓扑模型主要采用 L 空间模型和 P 空间模型,分别对应于公交站点网络和公交换乘网络。公交站点网络以公交站点为网络节点,在同一条公交线路上相邻的两个公交站点间连一条边。公交换乘网络同样以公交站点作为网络节点,同一条公交线路上的任意两个公交站点之间连上一条边,如图 1 所示。这两种抽象方法在其它形式的交通网络研究中也普遍采用,如铁路网络<sup>[7]</sup>、地铁网络<sup>[8]</sup>等。除此之外,对交通网络进行研究还有其他处理方法,如吴建军、高自友等考虑公交线路起讫站点形成的网络<sup>[9,10]</sup>。

P 空间模型中,每个公交站点的节点度  $k$  和节点间的距离具有明确的物理意义。节点度代表从该站点不需换乘公交线路所能到达的公交站点数,节点间的距离可解释为乘客从一个站点到达另一个站点所需乘坐的公交线路数目,即换乘次数 + 1。如图 2(b) 中,节点 3 的度为 5 表示从站点 3 不需换

乘可到达 5 个公交站点,节点 1 到 5 的距离为 2 表示乘客从站点 1 到站点 5 需要进行 1 次换乘才能到达.而 L 模型过度抽象使得特征参数值物理意义模糊,路径选择单纯追求路径最短,与乘客实际选择出入较大,难以反映实际公交路网特性.同时,从

图 1 中可以看出,同一城市的公交线路网络是公交换乘网络的子图,和公交线路网络相比,公交换乘网络包含了更多的信息.因此,本文主要研究城市公交系统在 P 空间映射下的网络即公交换乘网络的拓扑结构.

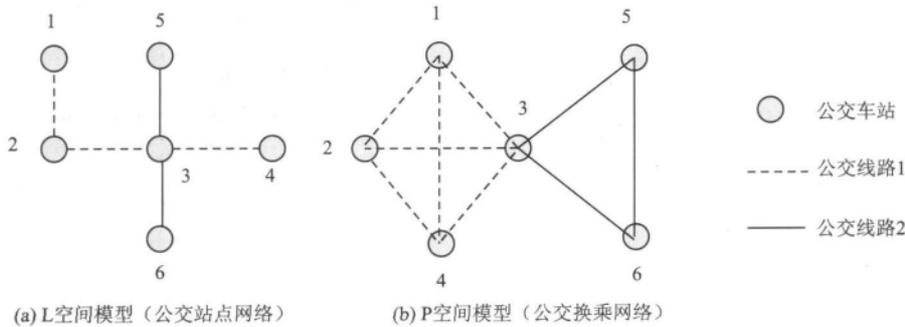


图 1 公交网络构建示意图

Fig.1 Schematic diagram of public transport network building process

### 3 公交复杂网络度分布

图 2 为公交站点数量前 5 名城市公交网络累积度分布分别在半对数坐标系中和双对数坐标系中的表现.从图中可以看出,这些网络的累积度分布在半对数坐标系下更接近于直线.对 330 个城市公交网络累积度分布分别进行指数和幂律拟合得到指数值、标准偏差和拟合度等信息,可以看出对每个城市的公交网络度分布更适合以指数分布进行描述,拟合得到的指数分布于(0.0085, 0.25).

网络度分布符合指数分布表明中国城市公交复杂网络不是传统的随机网络(节点度服从泊松分布),也不是择优增长的网络(节点度为幂律分布),而是随机演化的增长网络,新增公交站点与已有公交站点的连接方式为随机连接,此发现对 330 个城市具有普遍适应性,暗示这可能是公交系统演化的内在基本规律,对公交网络演化建模研究具有重要指导意义.

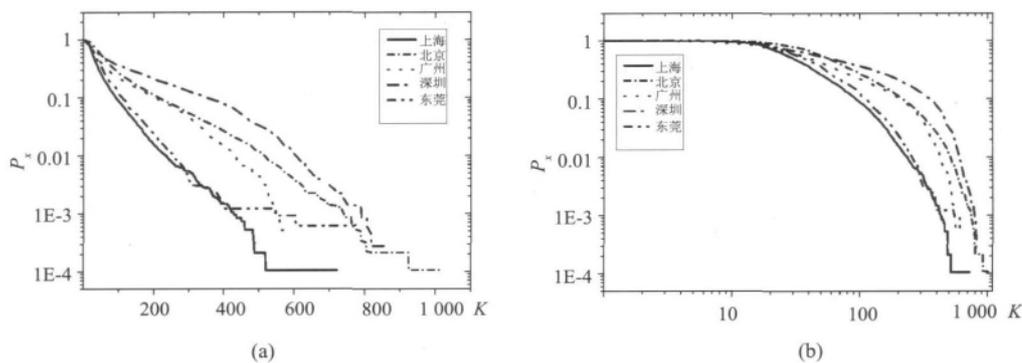


图 2 按站点数量前 5 位城市公交复杂网络累积度分布

(a) 半对数坐标系 (b) 对对数坐标系

Fig.2 Cumulative degree distribution of public transport complex networks in top 5 cities ranked by bus station numbers

(a) Under semi-logarithmic coordinate system (b) Under double logarithmic coordinate system

### 4 公交网络的小世界特征

复杂网络的小世界性质指网络具有如下拓扑特征:

$$C \gg C_{rand} \sim \langle k \rangle / N \quad (1)$$

$$L \gg L_{rand} \sim \ln N / \ln \langle k \rangle \quad (2)$$

在本文研究的 330 个城市的公交网络中,平均

最短路径最大的城市是上海(3.458),表示在上海市的9502个公交站点中,从任意一个站点到另外一个站点平均只需换乘2.458次即可到达.每个城市公交换乘网络簇系数分布于(0.707 465, 0.943 122),均远大于对应随机网络的簇系数.表1为按公交站点数量排名前10个城市公交换乘网

络基本统计参数.因全部城市公交网络的基本统计参数较多,无法在正文中有所体现,故本文中只节选前10个城市数据(如需要全部数据可与本文作者联系: xuqing1443@yahoo.com.cn).从这些统计结果可以看出,城市公交网络普遍具有较小的平均路径和较大的簇系数,即典型的小世界网络特征.

表1 站点数量前10个城市公交网络基本统计参数

Table 1 Basic statistical parameters of public transport network in top 10 cities ranked by bus station numbers

城市	线路数	站点数	节点平均度 $\langle k \rangle$	平均最短路径 $L$	平均簇系数 $C$	对应随机网络平均最短路径 $L_{rand}$	对应随机网络平均簇系数 $C_{rand}$
上海	1 641	9 502	44.607 5	3.458 36	0.772 095	2.411 66	0.004 694 53
北京	1 714	9 361	92.545 5	3.008 3	0.754 442	2.019 64	0.009 886 28
广州	1 256	3 891	75.584 7	3.132 69	0.750 83	1.911 2	0.019 425 5
深圳	884	3 594	122.892	2.639 77	0.736 208	1.701 62	0.034 193 7
东莞	346	3 269	52.140 1	2.983 14	0.819 721	2.046 63	0.015 949 9
成都	505	3 053	68.113 3	2.897 58	0.747 646	1.900 87	0.022 310 3
佛山	378	2 952	75.262 2	2.962 94	0.776 364	1.849 17	0.025 495 3
杭州	688	2 789	59.592	3.039 82	0.769 172	1.940 89	0.021 366 8
天津	552	2 721	122.375	2.846 06	0.716 554	1.645 23	0.044 974 2
苏州	341	2 662	79.235 2	2.683 47	0.762 288	1.803 77	0.029 765 3

### 5 公交网络同配性质

复杂网络的同配性质描述网络中节点之间的连接偏好,间接反映了网络的组织演化机制.如果度大的节点倾向于连接度大的节点,则称网络是正相关(Assortativeness),反之则是负相关(Disassortativeness).Pastor-Satorras等人<sup>[11,12]</sup>给出了同配性一个简洁直观的刻画,即计算度为 $k$ 节点的邻居节点的平均度,其值为 $k$ 的函数.对于正、负相关的网络,函数图形分别是 $k$ 的递增、递减曲线;对于不相关的网络,函数值为常数.随后,Newman指出只需计算节点度的Pearson相关系数 $r$ ( $-1 \leq r \leq 1$ )就可以描述网络的同配性<sup>[13]</sup>, $r$ 定义为

$$r = \frac{M^{-1} \sum_i j_i k_i - [M^{-1} \sum_i \frac{1}{2}(j_i + k_i)]^2}{M^{-1} \sum_i \frac{1}{2}(j_i^2 + k_i^2) - [M^{-1} \sum_i \frac{1}{2}(j_i + k_i)]^2} \quad (3)$$

式中 $j_i, k_i$ 分别表示连接第 $i$ 条边的两个顶点 $j, k$ 的度, $M$ 表示网络的总边数. $r$ 的取值范围为( $-1 \leq r \leq 1$ ),当 $r > 0$ 时,网络是正相关的;当 $r < 0$ 时,网络是负相关的;当 $r = 0$ 时,网络不相关.

Sienkiewicz等在文献[1]中分析了22个波兰

城市 $P$ 空间映射下公交网络的同配性,发现站点数量 $N < 500$ 的城市公交网络普遍负相关, $N > 500$ 的普遍正相关.对中国城市公交网络同配性的研究发现,这个相变点出现在大约 $N = 1\ 000$ 处,在 $N > 1\ 000$ 的32个城市中,度度正相关的城市为27个, $N < 1\ 000$ 的298个城市中,度度负相关的城市为240个,占90.03%,如图3所示.这表明,在 $N < 1\ 000$ 的城市公交系统中,度大的公交站点更倾向于连接度小的站点,而 $N > 1\ 000$ 的大城市公交系统中度大的站点更倾向于连接度大的站点,该结论对理解城市公交系统从原始站点到发展完善的演化规律及公交系统演化建模研究具有重要意义.

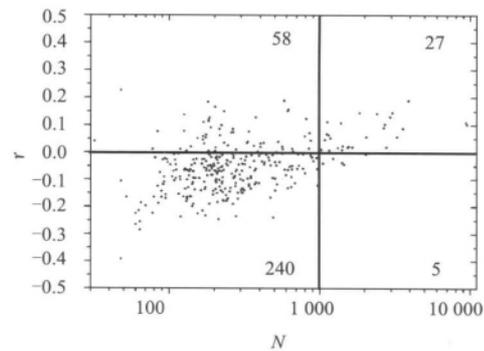


图3 各城市公交站点数量和网络同配性的关系

Fig. 3 The assortativity coefficient as a function of  $N$

## 6 公交复杂网络的等级模块性

定义  $\langle C(k) \rangle$  为度为  $k$  节点的平均簇系数, 则  $\langle C(k) \rangle$  与  $k$  之间的关系称为簇度相关性 (Clustering-Degree Correlations), 反映了不同度值节点间相互直接连接的聚类程度.

根据公交网络的构建机制, 同一条公交线路上的公交站点之间形成一个完全连通图, 每个公交站点的簇系数都为 1. 当某一公交站点同时还在其它公交线路上时, 如图 1 中的公交站点 3 同时属于公交线路 1 和 2, 公交站点 3 的节点度增加, 但线路 1 上其它站点和线路 2 上其它站点之间存在连边的可能性几乎肯定小于 1, 因此节点 3 的簇系数几乎肯定要减小. 可以看出, 在公交网络中, 节点的簇系数和节点度之间具有强烈的负相关性. 对中国城市的公交网络研究发现, 普遍存在如下现象: 对较小

的节点度, 平均度簇系数几乎保持不变, 接近于 1. 随着节点度的增加,  $\langle C(k) \rangle$  与  $k$  之间近似服从幂律关系:  $\langle C(k) \rangle \sim k^{-\beta}$ . 如图 4 所示为按公交站点数量前 4 位城市公交网络节点度与平均度簇系数的关系.

平均度簇系数随度的这种幂律变化行为表明该网络具有等级模块性<sup>[14,15]</sup>. 产生这种现象的原因可以由网络的构建机制来解释, 每条公交线路上的所有站点之间构成一个完全连通图, 从而形成一个局域世界, 整个公交网络就是由这些局域世界构成, 各个局域世界之间通过公交线路之间的共有站点发生联系. 最终导致公交网络中度很小的节点属于高度连接的小模块, 具有较高的簇系数, 而度很高的 hub 节点簇系数较低, 其作用只是把不同的模块连接起来.

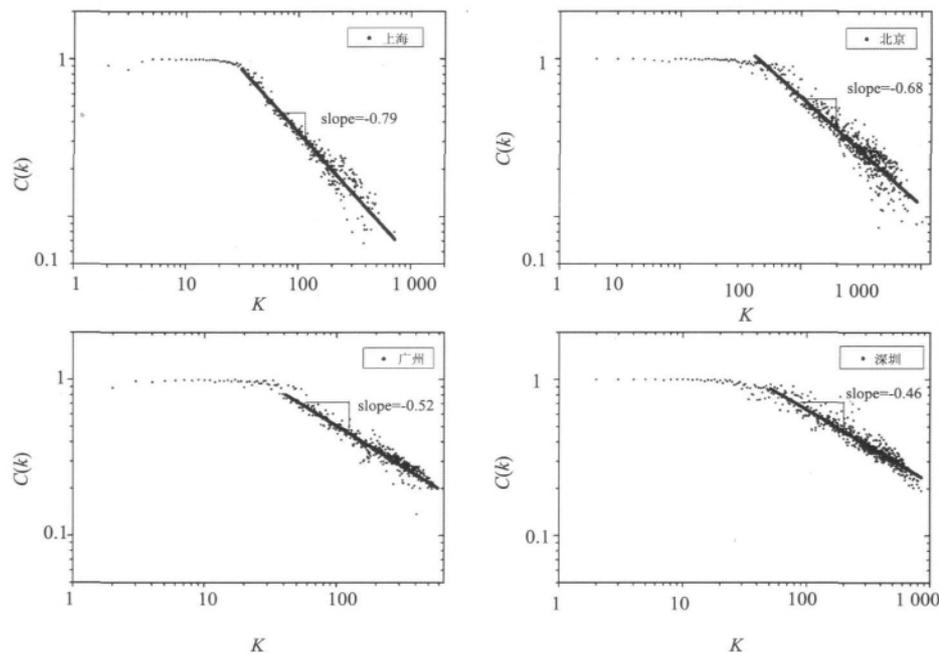


图 4 站点数量前 4 位城市公交网络  $\langle C(k) \rangle$  随  $k$  幂律下降

Fig. 4 The variation of the clustering coefficient  $\langle C(k) \rangle$  against the degree  $k$  for public transport network in top 4 cities ranked by  $N$  indicates a logarithmic decay for large  $k$

## 7 研究结论

对现实中的复杂系统进行实证研究是进行建模研究的基础. 本文收集整理了全国 330 个城市的公交数据, 建立了 P 空间下的城市公交复杂网络, 并针对复杂网络的小世界特性、度分布、网络同配性、等级模块性等结构属性进行了详细研究和横向

对比分析, 得出如下主要结论:

- (1) 网络度分布普遍呈指数分布, 表示公交网络演化机制为随机增长演化.
- (2) 普遍具有较大的簇系数和较小的平均路径长度, 呈现典型的小世界特征.
- (3) 网络同配性在公交站点数  $N$  等于 1 000

处发生相变,小于1 000的网络大部分呈负相关,大于1 000的网络大部分呈正相关。

(4) 对较小的节点度,节点度平均度簇系数几乎保持不变,接近于1。随着节点度的增加, $\langle C(k) \rangle$ 随 $k$ 的增大呈幂律下降关系,表示公交复杂网络具有显著的等级模块性。

各个城市公交网络规模具有很大的跨度,各城市社会、经济、人口等方面也都存在较大差异,本文通过对众多城市公交复杂网络结构参数进行纵向分析和横向比较,找到公交网络不依赖于这些外部因素的本质属性,本文研究成果可为探索城市公交网络演化机制及建模提供参考和指导作用。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Sienkiewicz J ,Holyst J A. Statistical analysis of 22 public transport networks in Poland [J]. *Physical Review E* , 2005 ,72( 4 ) :046127.
- [ 2 ] VonF C ,Holovatch T ,Holovatch Y ,et al. Public transport networks: empirical analysis and modeling [J]. *The European Physical Journal B* 2009 ,68: 261-275.
- [ 3 ] Li P ,Xiong X ,Qiao Z L ,et al. Topological properties of urban public traffic networks in Chinese top-ten biggest cities [J]. *Chinese Physical Letters* ,2006 ,23( 12 ) :3384-3387.
- [ 4 ] Lu H P ,Shi Y. Complexity of public transport networks [J]. *Tsinghua Science and Technology* ,2007 ,12( 2 ) :204-213.
- [ 5 ] 顾前,杨旭华,王万良,等. 基于复杂网络的城市公共交通网络研究 [J]. *计算机工程* ,2008 ,34( 20 ) :266-268. [GU Q ,YANG X H ,WANG W L ,et al. Research on urban public transport networks based on complex networks [J]. *Computer Engineering* 2008 ,34( 20 ) :266-268. ]
- [ 6 ] 惠伟,王红. 复杂网络在城市公交网络中的实证分析 [J]. *计算机技术与发展* ,2008 ,18( 11 ) :217-219. [ HUI W ,WANG H. Empirical analysis of complex networks in public traffic networks [J]. *Computer Technology and Development* ,2008 ,18( 11 ) :217-219. ]
- [ 7 ] Sen P ,Dasgupta S ,Chatterjee A ,et al. Small-world properties of the Indian railway network [J]. *Physical Review E* 2003 ,67( 3 ) :036106.
- [ 8 ] Latora V ,Marchiori M. Is the Boston subway a small-world network? [J] *Physical A* ,2002 ,314( 1 ) :109-113.
- [ 9 ] Wu J J ,Gao Z Y ,Sun H J ,et al. Urban transit system as a scale-free network [J]. *Modern Physics Letters B* , 2004 ,18( 19&20 ) :1043-1049.
- [10] 吴建军. 城市交通网络拓扑结构复杂性研究 [D]. 北京交通大学,2008. [WU J J. Studies on the complexity of topology structure in the urban traffic network [D]. Beijing Jiaotong University 2008. ]
- [11] Pastor S R ,Vázquez A ,Vespignani A. Dynamical and correlation properties of the Internet [J]. *Physical Review Letters* 2001 ,87( 25 ) :258701.
- [12] Vázquez A ,Pastor S R ,Vespignani A. Large-scale topological and dynamical properties of the Internet [J]. *Physical Review E* 2002 ,65( 6 ) :066130.
- [13] Newman M E J. Assortative mixing in networks [J]. *Phys Rev Lett* ,2002 ,89( 20 ) :208701.
- [14] Ravasz E ,Barabási A L. Hierarchical organization in complex networks [J]. *Physical Review E* ,2003 ,67( 2 ) :026112.
- [15] Ravasz E ,Somera A L ,Mongru D A ,et al. Hierarchical organization of modularity in metabolic networks [J]. *Science* 2002 ,297( 5586 ) :1551-1555.