

探索城市公交客流移动模式

王明生^{1,2}, 黄琳², 闫小勇²

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院 北京 海淀区 100044; 2. 石家庄铁道大学交通运输学院 石家庄 050043)

【摘要】以石家庄市公交客流调查数据为实证研究对象,对城市公共交通网络的客流移动模式进行了统计分析。发现公交网络的站点上下车人数具有强烈的异质性,站点间客流量分布具有幂律分布特征,而公交乘客却具有峰值的出行距离分布,可以用负二项分布函数拟合。用随机游走模型再现了实证中观测到的标度性站间客流分布和有峰值的出行距离分布,并探讨了这些统计特征形成的可能机制。

关键词 人类动力学; 人类移动模式; 公交网络; 随机游走

中图分类号 U491.1

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2012.01.001

Exploring the Mobility Patterns of Public Transport Passengers

WANG Ming-sheng^{1,2}, HUANG Lin², and YAN Xiao-yong²

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University Haidian Beijing 100044;

2. Department of Transportation Engineering, Shijiazhuang Tiedao University Shijiazhuang 050043)

Abstract The mobility patterns of passengers in a public transport network are explored based on Shijiazhuang bus passengers survey data. The results show that the inflows and outflows of different stations in the network are strongly heterogeneous and the traffic flow among stations follows a power law distribution. The results also show that the travel distance distribution of public transport passengers is peaked, which can be fitted by a negative binomial distribution. The potential mechanism leading to these statistical characteristics are explained by three random walk models, one of which can reproduce the scaling distribution of traffic flow and the peaked distribution of travel distance.

Key words human dynamics; human mobility patterns; public transport network; random walk

公共交通网络是城市中重要的基础设施,也是一类典型的复杂网络^[1]。研究该类复杂网络的结构与功能特点,对于合理规划城市公交系统、提高城市公交服务效率、缓解城市交通拥堵等具有重要意义^[2]。目前对于公交网络复杂性的研究主要集中在网络拓扑结构分析与演化建模方面。实证研究^[3-8]揭示了城市公交网络普遍具有无标度、小世界及社团化等特征,一些公交网络演化模型^[7-10]也被陆续提出,深化了对公交网络的拓扑特征和演化机制的认识。但是,公交网络的复杂性不仅体现为拓扑结构的复杂性,而且更为复杂的是乘客在公交网络上的移动过程。遗憾的是,相对于拓扑结构数据,公交网络的客流数据更难获取,这在一定程度上限制了对公交网络中客流移动模式的理解。

近年来,运用统计物理方法研究人类的空间运

动行为,已逐渐成为人类动力学的一个重要研究方向^[11-20]。研究者通过对美元流通数据^[14]、手机通信记录^[15]及出行日志数据^[16]等数据进行实证统计发现,人类群体移动的出行距离分布具有无标度特征。由于实证研究所使用的数据中混合了多种交通方式使用者的出行行为,为了探析某种特定交通方式使用者的空间运动模式,一些研究者进行了更为细致的实证研究,例文献^[17]发现瑞典4个城市出租车乘客的出行距离分布具有双段幂律特征;文献^[18]通过车载GPS数据对意大利佛罗伦萨市私家车驾驶者的出行行为进行实证统计,发现驾驶者的出行距离服从指数分布;文献^[19]对伦敦地铁乘客移动模式进行实证分析,发现地铁乘客的出行距离既不具有幂律分布特征也不具有指数的特征,而是一个具有峰值分布的特点,可以近似用负二项分布拟合。上

收稿日期: 2011-12-15

基金项目: 河北省科技支撑计划(10217114D); 河北省教育厅科研计划(Z2009139)

作者简介: 王明生(1964-),男,教授,主要从事轨道交通规划与设计方面的研究。

述的研究结果说明, 对于特定的交通方式, 其使用者的空间运动模式都具有独特的特征。但对于城市常规公交的客流移动模式, 目前仍然缺乏相关的实证研究。

本文以石家庄市公交客流调查数据为实证研究对象, 对公交乘客的移动模式进行统计分析, 分别统计了公交网络站点的上下车人数分布、站点间的客流量分布和公交乘客的群体出行距离分布3个特征, 发现站点上下车人数和站点间客流量分布都具有强烈的异质性, 表现出标度性的分布特征, 而出行距离分布却具有峰值的分布特征。本文还用随机游走模型再现了标度性的站间客流分布和有峰值的出行距离分布, 并探讨了这些统计特征形成的可能机制。

1 数据描述

本文所分析的数据是2007年石家庄市的公交客流调查数据。该数据集包含了石家庄市93条公交线路在某工作日全天的乘客出行记录。数据集中共有出行记录783 210条, 每条记录包括一次公交出行中乘客所乘坐的公交线路以及上下车站点信息。在所调查的93条公交线路上, 共有公交停靠站4 556个。由于一些不同线路上的停靠站在地理上处于同一位置, 本文按照处于同一位置的停靠站合并为一个站点的原则对所有停靠站进行了合并处理, 共得到738个独立的公交站点。图1是所调查的公交线路及其站点布局图。

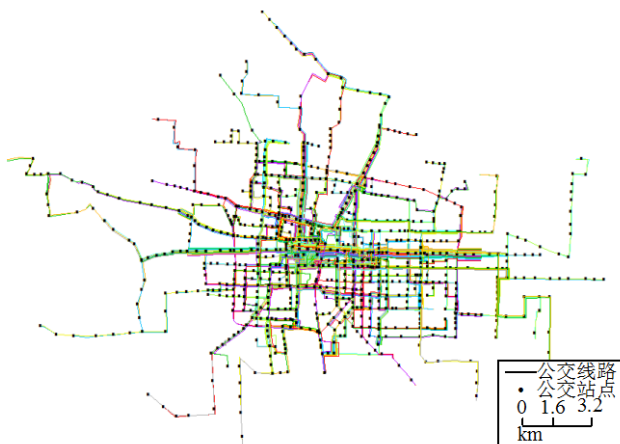


图1 石家庄市公交线路和站点布局图(2007年)

2 实证结果

2.1 站点上下车人数分布

本文分别统计了738个站点的上车人数和下车人数, 并将站点分别按上车人数和下车人数由大到

小进行排序, 结果如图2所示。从图中可以看出, 站点上下车人数分布具有强烈的异质性: 少数几个车站集中了大部分的上下车乘客, 而绝大多数车站的上下车人数都很少。其中, 前200个车站的上下车人数很好地符合Zipf律, 即有 $Z(r) \sim r^{-0.75}$, 这部分站点的上下车人数占全部客流量的比例超过80%。

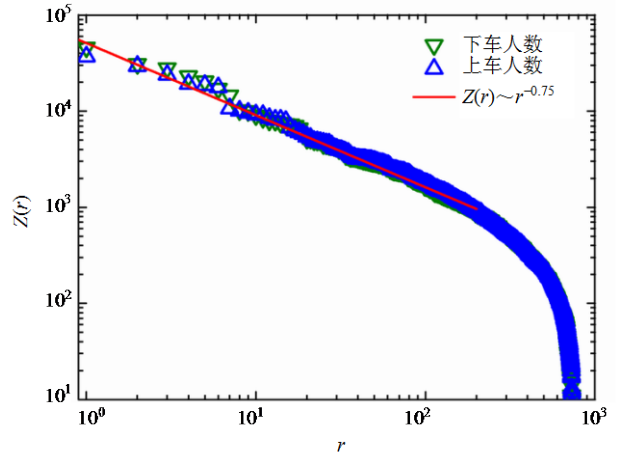


图2 按上下车人数对站点排序的Zipf图

为进一步分析站点上下车人数异质性分布的原因, 在城市地图上绘制了站点上下车人数的空间分布图, 如图3所示。从图中可以看到, 上下车人数较多的车站主要集中在城市的中心区范围, 越往城市外围, 站点上下车人数相对就越少, 这与单中心城市的人口空间分布规律^[21]是一致的。因此, 可以认为站点上下车人数的异质性分布主要是由城市人口分布的异质性所导致的。

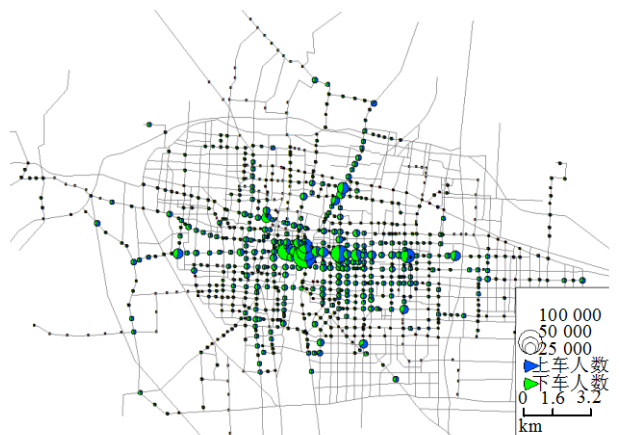


图3 站点上下车人数空间分布

2.2 站点间客流量分布

站点上下车乘客数量的分布只能反映公交网络中节点的流入、流出量, 为了更深入地分析公交网络上乘客的流动规律, 还需要对站点间的客流量进行分析。本文统计了公交网络中每两个站点之间的

乘客出行量,发现其近似服从指数为-1.96的幂律分布的特征,如图4所示。图中的斜直线是用极大似然法估计得到的幂律分布函数, k-s检验的 p 值为0.26。该结果说明公交网络中客流量的分布同样具有强烈的异质性:大部分站点之间的客流量很小,但少数站点之间会具有极大的客流量。这一结果与对地铁网络^[19,22]和城市街道网络^[23-25]中观测到的交通流分布规律类似,说明无标度的流量分布可能是城市交通网络中群体流动的一种普遍模式。

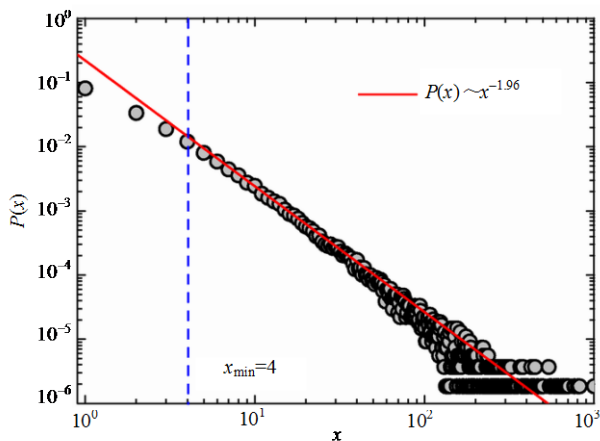


图4 站点间客流量分布图

2.3 出行距离分布

出行距离分布是刻画人类移动模式的一个关键统计特征,也是目前人类动力学研究广泛关注的一个统计特征^[1,14-19]。本文统计的石家庄市公交网络中乘客的出行距离分布如图5所示。图中直线是数据拟合曲线;插入图是在线性坐标下绘制的相同内容,可以发现它在5 km附近存在峰值,并具有指数尾部,与文献[19]中对地铁乘客出行距离分布的统计规律类似。因此,本文也使用文献[19]建议的负二项分布函数描述公交乘客的出行距离分布。负二项分布的概率质量函数为:

$$f(d) = C_{d+r-1}^{r-1} p^r (1-p)^d \quad (1)$$

式中, d 是出行距离; r 、 p 分别是负二项分布的两个参数。

在本文中,根据乘客出行距离的实证数据用极大似然法估计得到的负二项分布的参数值分别为 $r=4.96$, $p=0.51$ 。

进一步统计的公交网络中站点间的公交线路长度分布如图6所示,可以发现它与出行距离分布的规律类似,同样可以用负二项分布函数近似,参数值分别为 $r=4.83$, $p=0.37$ 。这一结果暗示着出行距离分布的形成与网络结构特征具有密切关系,与文

献[17,20]的研究结论相符。但两次统计得到的两个分布参数 r 和 p 的不一致,说明影响出行距离分布的因素并不仅仅是网络结构这一种因素。对于公交乘客出行距离分布的形成机制,尚需要进一步的解释。

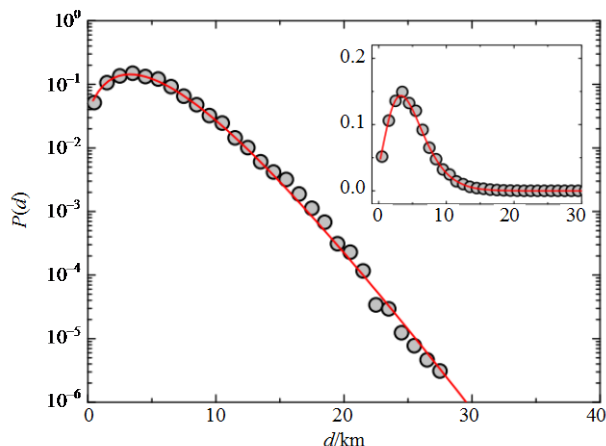


图5 乘客出行距离分布

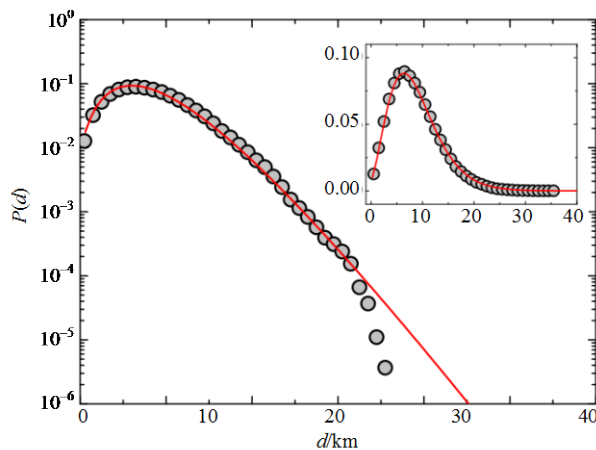


图6 站点间公交线路长度分布

3 随机游走模型

随机游走模型是目前对人类空间运动行为进行建模的一种重要方法^[17,20,23],它在解释层次性交通网络中旅行者行程分布标度律的形成机制^[20]和再现城市街道网络车流分布状态^[23]等方面都获得了成功。本文采用文献[17]中提出的实际交通网络中的随机游走模型解释公交客流移动模式产生的可能机制。由于站点上下车人数的异质性可以看作是城市人口异质性分布的结果,而关于城市人口异质性分布的形成机制目前已有较多研究^[21,26-28]。因此,本文主要用随机游走模型分析站点间客流量分布和出行距离分布这两个统计特征。

首先,用 P -Space描述方式^[3]将实际的公交网络抽象成网络模型。具体方法为:将公交网络中的站

点抽象为网络中的节点, 如果两个站点处于同一条公交线路, 则在两站点之间添加一条边, 并将边权设为两站点之间公交线路所经由的街道长度(如果两站点之间有多条线路, 则选取空间距离最短的一条)。随后, 在网络节点上放置一定数量的游走者, 并设定随机游走规则。根据游走者初始分布状态和游走规则的不同, 本文设计了以下3种随机游走模型。

模型1 在网络中的每个站点上放置1个随机游走者。在每一时步, 游走者等概率地选择一个与其当前所在站点有直接连边的站点(以下简称近邻站点), 并移动到该站点。

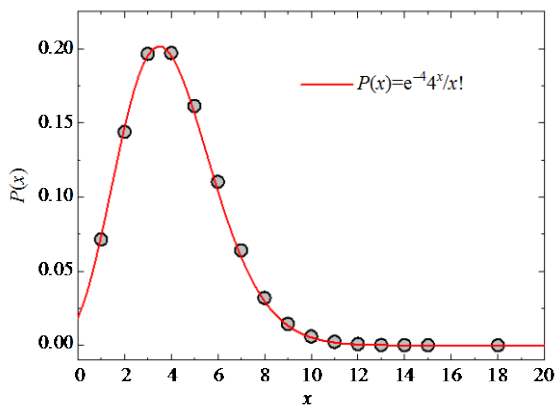
模型2 在网络中的各站点上, 按照实际的上车人数放置随机游走者。在每一时步, 游走者按正比于其近邻站点下车人数的概率选择一个站点, 并移动到该站点。

模型3 随机游走者的初始位置设置方法同模型2。在每一时步, 游走者按正比于的概率 p_i 选择一个近邻站点并移动, 且有:

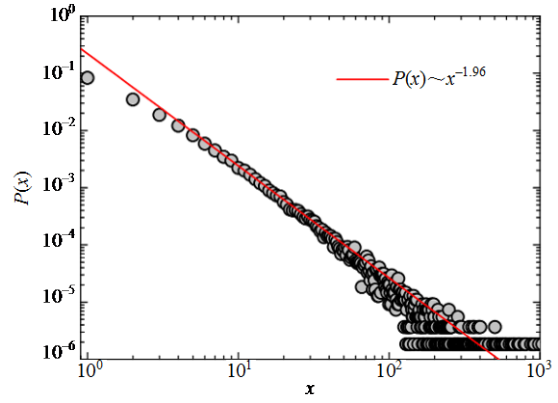
$$p_i = \frac{T_i f(d_i)}{\sum_{j=1}^n T_j f(d_j)} \quad (2)$$

式中, T_i 是站点*i*的下车人数; d_i 是当前游走者所在站点到站点*i*的距离; $f(d_i)$ 是一个减函数。

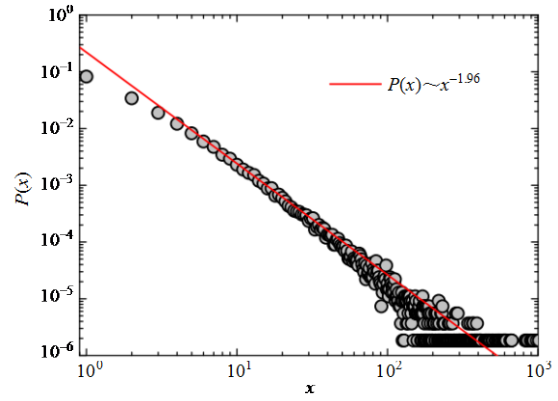
对3种模型分别进行数值仿真, 结果如图7所示, 图中数据是模型仿真运行1 000步后的统计结果。为与实证数据中的出行总量保持一致, 图7b和图7c的横坐标根据仿真步长进行了重新标度(即将模型仿真得到的客流量除以仿真步长后取整)。此外, 为便于将模型仿真生成的出行距离分布结果与实证结果进行对比, 在图7b~图7c中添加了根据实际的站点间客流量数据拟合得到的分布函数曲线, 在图7d~图7f中添加了根据实际的乘客出行距离数据和站点间公交线路长度数据拟合得到的分布函数曲线。



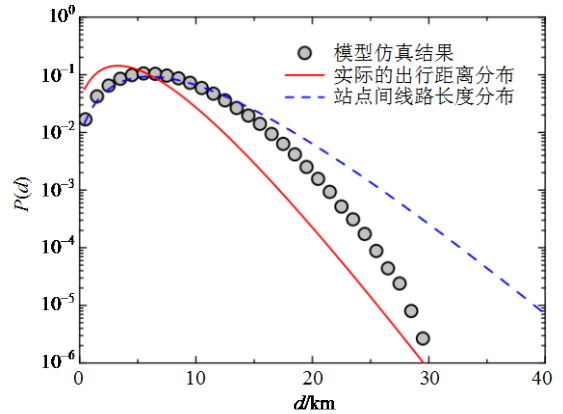
a. 模型1生成的站点间客流量分布



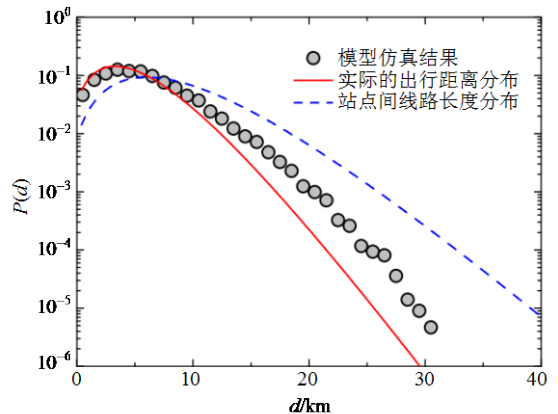
b. 模型2生成的站点间客流量分布



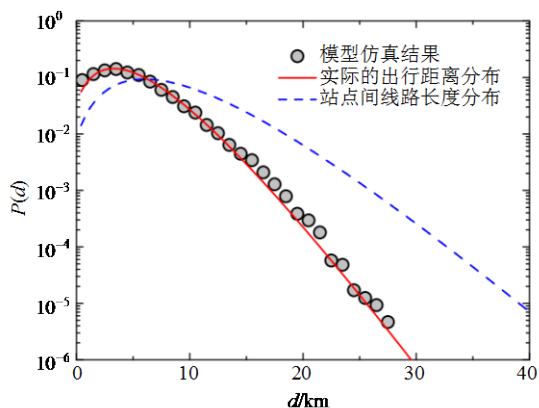
c. 模型3生成的站点间客流量分布



d. 模型1生成的出行距离分布



e. 模型2生成的出行距离分布



f. 模型3生成的出行距离分布

图7 3种随机游走模型的仿真结果

模型1是最简单的空间网络上的随机游走模型^[1],它只考虑了网络的拓扑结构,而没有考虑站点上下车人数分布以及乘客的个体移动行为。该模型产生的站点间客流量分布和出行距离分布分别见图7a和图7d。从图中可以看出,模型生成的站点间客流量近似服从参数 $\lambda=4$ 的泊松分布,而没有表现出任何的标度特征。同时,模型生成的出行距离分布也与实际网络中的乘客出行距离分布不符。这说明,仅考虑网络拓扑结构一种因素并不能完全解释公交网络的客流移动模式。

模型2类似于文献[20]中提出的含权网络上的随机游走模型,所不同的是,模型2使用的点权不是节点重要程度,而是实际的站点上下车客流量。该模型能够很好地再现标度性的站点间客流量分布,如图7b所示。但模型生成的出行距离分布如图7e所示,仍与实证结果不符。相对于实证结果,模型仿真结果中的长距离出行比例更高,这说明出行者在选择目的地时并不是完全随机的,而是表现出倾向于选择更近距离目的地的行为。

模型3用式(2)中递减的距离函数 $f(d_i)$ 体现个体移动过程中倾向于选择更近距离目的地的行为。式(2)的实际意义可以理解为在其他条件等同时,距离更近的站点对个体具有更高的吸引力。本文分别测试了幂函数和指数函数这两种常用的减函数,发现当采用指数函数 $e^{-0.15d_i}$ 作为距离函数时,模型能够产生和实证结果相吻合的站点间客流量分布和出行距离分布,分别如图7c和图7f所示。

综合分析前述3种随机游走模型的仿真结果,可以得出结论:公交乘客的出行距离分布不仅与公交网络拓扑结构有关,还与乘客个体的出行目的地选择行为有密切的关系。该结论与文献[17]的研究结论不同,文献[17]认为出行距离分布仅受交通网络拓扑

结构特征影响,而与人的出行行为无关。另外,注意到模型2和模型3能产生与实证结果几乎一致的站点间客流量分布,说明个体行为对站点间客流量分布模式的影响并不显著,站点间客流量的异质性主要是由站点上下车人数的异质性分布所导致。

4 总结

本文以石家庄市公交客流调查数据为实证研究对象,对公交乘客的移动模式进行了统计分析。实证统计结果显示,在公交客流量空间分布模式方面,无论是站点上下车人数分布,还是站点间客流量分布,都具有强烈的异质性,表现出标度性的分布特征。而在当前人类动力学研究所关注的出行距离分布方面,发现公交乘客的出行距离分布是有峰值和指数尾部的,可以用负二项分布拟合。

通过建立实际网络上的随机游走模型再现了公交网络中标度性的站点间客流分布和有峰值的出行距离分布。在对3种随机游走模型进行仿真分析的过程中可发现,站点间客流分布的标度律主要由站点上下车人数的异质性分布所导致,几乎不受人个体移动行为的影响。但个体移动行为对出行距离分布的影响则很显著,说明出行距离分布并不仅仅与交通网络的拓扑结构有关。这些结果显示,对于人类群体移动模式形成机制的研究不能仅从对某种单一因素的影响分析着手,而是应该综合考虑交通网络的结构特征、出行者的行为特征以及与交通系统相关联的城市人口和用地布局等因素,才有可能获得更全面和清晰的认识。

参 考 文 献

- [1] BARTHÉLEMY M. Spatial networks[J]. Physics Reports, 2011, 499: 1-101.
- [2] 高自友, 吴建军, 毛保华, 等. 交通运输网络复杂性及其相关问题的研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2005, 5(2): 79-84.
GAO Zi-you, WU Jian-jun, MAO Bao-hua, et al. Study on the complexity of traffic networks and related problems[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2005, 5(2): 79-84.
- [3] 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.
- [4] SIENKIEWICZ J, HOŁYST J A. Statistical analysis of 22 public transport networks in Poland[J]. Physical Review E, 2005, 72: 046127.
- [5] LI P, XIONG X, QIAO Z L, et al. Topological properties of urban public traffic networks in Chinese top-ten biggest cities[J]. Chinese Physics Letters, 2006, 23(12): 3384-3387.

- [6] CHEN Y Z, LI N, HE D R. A study on some urban bus transport networks[J]. *Physica A*, 2007, 376: 747-754.
- [7] YANG X H, WANG B, WANG W L, et al. Research on some bus transport networks with random overlapping clique structure[J]. *Commun Theor Phys*, 2008, 50(5): 1249-1254.
- [8] FERBER C V, HOLOVATCH T, HOLOVATCH Y, et al. Public transport networks: empirical analysis and modeling[J]. *Eur Phys J B*, 2009, 66(2): 261-275.
- [9] SU B B, CHANG H, CHEN Y Z, et al. A game theory model of urban public traffic networks[J]. *Physica A*, 2007, 379(1): 291-297.
- [10] ZHU Z T, ZHOU J, LI P, et al. An evolutionary model of urban bus transport network based on B-space[J]. *Chinese Physics B*, 2008, 17(8): 2874-2880.
- [11] 汪秉宏, 韩筱璞. 人类行为的动力学与统计力学研究[J]. *物理*, 2010, 39(1): 28-37.
WANG Bing-hong, HAN Xiao-pu. The dynamics and statistical mechanics of human behaviors[J]. *Physics*, 2010, 39(1): 28-37.
- [12] 韩筱璞, 汪秉宏, 周涛. 人类行为动力学研究[J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2010, 7(2-3): 132-144.
HAN Xiao-pu, WANG Bing-hong, ZHOU Tao. Researches of human dynamics[J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2010, 7(2-3): 132-144.
- [13] 樊超, 郭进利, 韩筱璞, 汪秉宏. 人类行为动力学研究综述[J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2011, 8(2): 1-17.
FAN Chao, GUO Jin-li, HAN Xiao-pu, et al. A review of research on human dynamics[J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2011, 8(2): 1-17.
- [14] BROCKMANN D, HUFNAGEL L, GEISEL T. The scaling laws of human travel[J]. *Nature*, 2006, 439: 462-465.
- [15] GONZÁLEZ M C, HIDALGO C A, BARABÁSI A L. Understanding individual human mobility patterns[J]. *Nature*, 2008, 453: 779-782.
- [16] 闫小勇. 人类个体出行行为的统计实证[J]. *电子科技大学学报*, 2011, 40(2): 168-173.
YAN Xiao-yong. Empirical statistics on individual human travel behavior[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2011, 40(2): 168-173.
- [17] JIANG B, YIN J J, ZHAO S J. Characterizing the human mobility pattern in a large street network[J]. *Physical Review E*, 2009, 80: 021136.
- [18] BAZZANI A, GIORGINI B, RAMBALDI S, et al. Statistical laws in urban mobility from microscopic GPS data in the area of Florence[J]. *J Stat Mech-Theor Exp*, 2010, P05001.
- [19] ROTH C, KANG S M, BATTY M, et al. Structure of urban movements: polycentric activity and entangled hierarchical flows[J]. *PLoS ONE*, 2011, 6: 15923.
- [20] HAN X P, HAO Q, ZHOU T, et al. Origin of the scaling law in human mobility: hierarchy of traffic systems[J]. *Physical Review E*, 2011, 83: 036117.
- [21] ROZENFELD H D, RYBSKI D, ANDRADE J S, et al. Laws of population growth[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(48): 18702-18707.
- [22] LEE K, JUNG W S, PARK J S, et al. Statistical analysis of the metropolitan seoul subway system: network structure and passenger flows[J]. *Physica A*, 2008, 387(24): 6231-6234.
- [23] JIANG B. Agent-based simulation of human movement shaped by the underlying street structure[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2011, 25(1): 51-64.
- [24] JIANG B. Street hierarchies: a minority of streets account for a majority of traffic flow[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2009, 23(8): 1033-1148.
- [25] LAMMER S, GEHLSSEN B, HELBING D. Scaling laws in the spatial structure of urban road networks[J]. *Physica A*, 2006, 363(1): 89-95.
- [26] MAKSE H A, HAVLIN S, STANLEY H E. Modelling urban growth patterns[J]. *Nature*, 1995, 377: 608-612.
- [27] MARSILI M, ZHANG Y C. Interacting individuals leading to zipf's law[J]. *Physical Review Letters*, 1998, 80(12): 2741-2744.
- [28] BATTY M. The size, scale, and shape of cities[J]. *Science*, 2008, 319(8): 769-771.

编辑 蒋晓