

Scaling Behaviors of the Urban Street Networks in Taiwan

Yu-Ling Chiang*, Chung-I Chou, Yu-Xiang Chen

Department of Physics, Chinese Culture University, Taipei
Email: *yuling@faculty.pccu.edu.tw

Received: Jan. 9th, 2012; revised: Jan. 23rd, 2012; accepted: Feb. 1st, 2012

Abstract: We studied the scaling behaviors of the urban street networks in Taiwan. We established the primal and dual graphs of networks from several sample cities (Taipei, Taichung, Tainan, Kaohsiung), and analyzed their statistical properties such as degree distributions and street length distributions. The results show, the cumulative distribution functions (CDF) of connectivity and length of road are both following the approximate power law.

Keywords: Street Networks; Small World; Scaling; Taiwan

台湾都市街道网络的标度性质

蒋幼龄*, 邹忠毅, 陈钰翔

中国文化大学物理系, 台北
Email: *yuling@faculty.pccu.edu.tw

收稿日期: 2012年1月9日; 修回日期: 2012年1月23日; 录用日期: 2012年2月1日

摘要: 我们研究了台湾都市街道网络的标度性质。建立了数个都市(台北市、台中市、台南市和高雄市)的基本与二重网络图; 分析它们的各种统计性质(例如度分布、度关联性、特征长度、整体与局部特征等等)。结果显示, 各城市道路长度和连接数的累积分布函数都大致遵守幂次律下降的函数形式。

关键词: 街道网络; 小世界; 标度性质; 台湾

1. 引言

本文由社会物理学的方法入手, 透过种种形式的网络, 系统中的小单元得以和其它单元作用, 产生整体性质来研究台湾都市街道网络的标度性质。在最近十几年, 科学家们发现了与人类生活密切相关的一种网络型态, 它们被称为小世界网络(small world network)。小世界网络主要有几个特色^[1,2]: 1) 两点间的最小连接次数少; 2) 具有集散(hub)点结构。在某些情况下, 如果分析小世界网络的各结点上的连结度, 常符合幂次律分布(power-law distribution)关系, 而此网络的性质往往与尺度无关, 于是这种网络被称为无尺度网络(scale-free network)。小世界网络与无尺

度网络可以在许多现象中发现, 例如意见传播、特殊事件(地震、森林火灾、战争等等)的发生频率、交通网络、因特网等等。

社会物理学(sociophysics)指的是利用物理学的研究方法以进行社会科学问题的研究^[3,4]。研究者们延续了第谷(Tycho Brahe)、克普勒(Johannes Kepler)、牛顿(Isaac Newton)以来, 由经过观察现象、搜集数据、寻找规律、建立理论、解释及预测现象等过程的一套研究传统, 对社会经济问题做了一些工作。这些研究者面对的是复杂的社会现象, 使用统计物理方法与计算机仿真工具, 由简单的模型与交互作用出发, 却往往得到与真实现象相符的结果。

一般说来, 社会物理学的研究大约分为三个阶段。一是数据收集, 二是分析数据并找出规律, 最后

*通讯作者。

是由基本模型推演出规律。分述如下：

数据来源可分为几方面，一是来自现有的数据库：例如政府的统计资料，人口、选举、国富统计等。又如经济活动纪录，股票、期货等交易讯息。另外还有其它数据库，如消费者网站、民意或问卷调查。二是基于现有技术的实际测量量：如自行设计交通流量的实际观测、自行举行的调查与问卷。三是跨领域合作，利用新技术及新想法，设计新的实验与测量：例如与医学工程、社会心理学的研究人员合作。

在分析数据时通常采用的方向，一是利用传统统计学方法，找出分布情况、各种统计量值、及进行关联性分析。二是近年来越来越受重视的关联网络分析，找出关联网络的特征、连接性质与关联性。在分析结果中，有两个特征特别受到重视，即统计性质中的长尾现象(特别是幂次律下降分布)与无尺度网络的出现。这两个特征往往伴随着相变现象，此时系统常常处于某种有序与无序的临界点上，只要某些控制因子变化，系统即可能发生巨变。

最后是由基本模型推演出规律。这是物理学者的强项，也是社会物理研究的重点。由建立简化的微观基本模型，推导出宏观的整体现象，透过比对理论与实际的结果，推论现象发生的原因。在此阶段研究者常常将社会群体分为大量的基本单元，藉由研究单元之间的交互作用形式及网络，配合数学计算与计算机仿真，往往可以得到与真实世界相符的整体性质。

本文中我们利用统计物理方法研究了台湾的四个都市街道网络的标度性质，包括台北市及改制¹前的台中市、台南市和高雄市(由北至南见图1)。目前尚无台湾都市在此方面的相关研究，而选择此四个都市是因为它们的人口密度较高。

文献中^[5]在不同型态城市的街道展现了小世界网络与无尺度网络的型态。台湾这四个都市的面积大小、人口密度^[6](见表1)、规划和演进不尽相同，我们希望能统计分析的帮助下，看出不同都市的街道特征。此研究除了可充实社会物理学现有的领域和基础外，更可藉由数据的分析掌握城市发展及地理和人文社会之间的关联。

¹2010年12月25日台湾行政区划施行改制(县市合并、升格直辖市)，除了台北市以外，台北县升格为新北市、台中县市、台南县市、高雄县市都各自合并为新城市。



Figure 1. Map of Taiwan, the marks are the cities from north to south: Taipei, Taichung, Tainan, and Kaohsiung
图1. 台湾地图，特别标示之都市由北至南为台北市、台中市、台南市和高雄市

Table 1. The areas and population densities of the 4 cities
表1. 都市面积与人口密度

都市	面积(km ²)	人口密度(人/km ²)
台北市	271.7997	9612
台中市	163.4256	6552
台南市	175.6456	4386
高雄市	153.5927	9941

2. 方法

我们利用地理信息系统(GIS)^[7]获得四个都市的街道图(图2(a)~(d))。

本文中我们将关注道路连接度(或连接数)和道路长度的分布。在文献中许多城市的道路连接数^[8-11]和道路长度^[11-13]分布，符合幂次律分布关系 $p(x) \sim x^{-\alpha}$ 。一般来说，研究分布函数关系时会先绘出直方图(histogram)，但是为避免取样宽度及归一化数据等问题的困扰，常常直接以绘出累积分布函数(cumulative distribution function, CDF)来代替分布函数。累积分布函数指的是全部样本中值大于 x 的总数量。而这两个分布函数的数学关系为

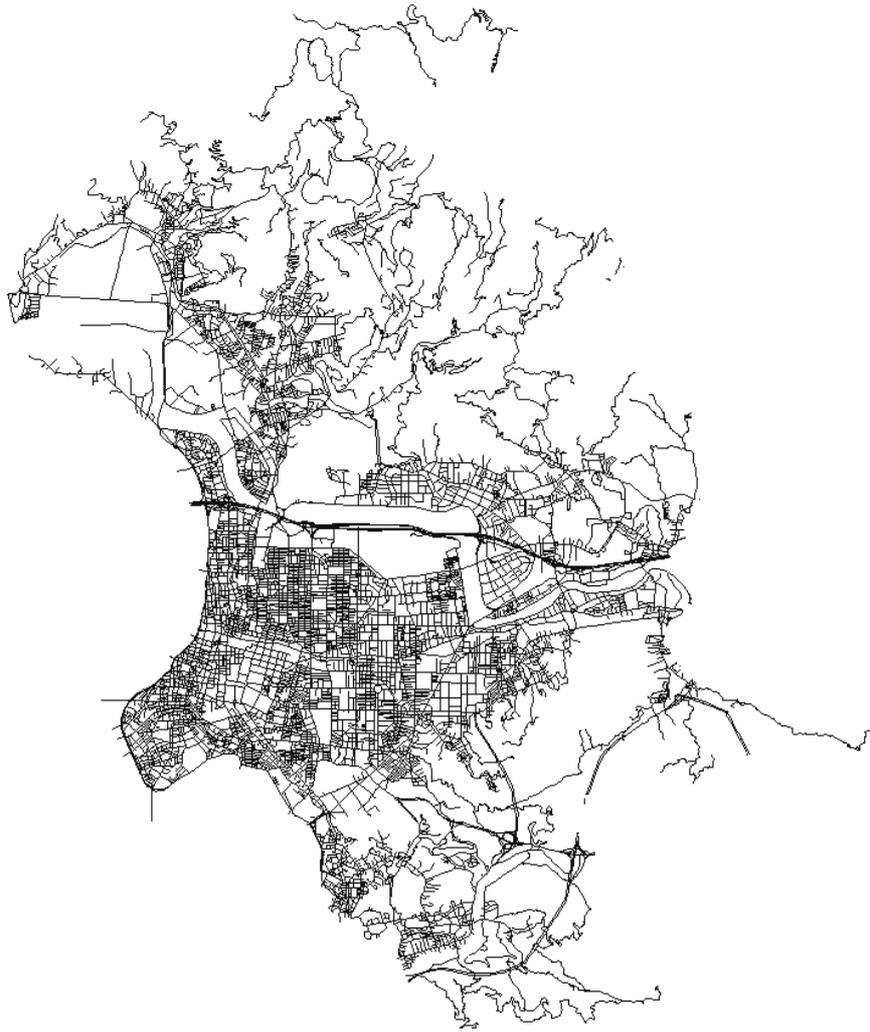
$$p_{>}(x) = \int_x^{\infty} p(x') dx'. \quad (1)$$

本文所绘分布函数图都是累积分布函数。

在GIS系统中，一条道路可能分为数笔数据纪录，我们必须以人工方式合并道路数据。本文使用以下的规则来处理道路数据：

- 1) 道路不分段。
- 2) 同名道路视为同一道路。

台湾都市街道网络的标度性质



(a)



(b)



Figure 2. (a) Taipei street networks; (b) Taichung street networks; (c) Tainan street networks; (d) Kaohsiung street networks
图 2. (a) 台北市街道网络; (b) 台中市街道网络; (c) 台南市街道网络; (d) 高雄市街道网络

- 3) 道路以『巷』为最小单元。
- 4) 快速道路视为一条独立道路。
- 5) 高速公路视为一条有连结的道路。

人工整理道路数据时，有两处我们认为需要特别说明和处理的数据，其一是台中市，二是高雄市，分别说明如下。

2.1. 台中市

台中市北屯区右边有一区域(图 3(a)垂直黑线的右边)，道路分布呈树枝状(图 3(b))，与台中市其它区域明显不同，仔细分析其道路发现，即使相同名称之巷道却呈现道路不连接之现象。

最初由于道路合并的困难我们去除此区域来处理数据。后面的讨论中我们分别分析了去除与保留此

区域之数据的结果。

2.2. 高雄市

高雄市与其它三个都市道路命名方式明显不同，举例来说，其它都市中某路『一段、二段』是长度较长的路以分段的方式来简化道路位置的分辨率，所以在选择规则中，我们视其为同一条道路。但是高雄市较长的道路是以『一路、二路或一街、二街』²来分段，依规则在路名上他们成了不同的道路。我们也分别分析了高雄市不合并这些道路与合并后之数据的结果。

3. 结果

经分析后发现台湾四个主要城市道路的连接数

² 都市道路中一路、二路或一街、二街通常并非相连的道路。

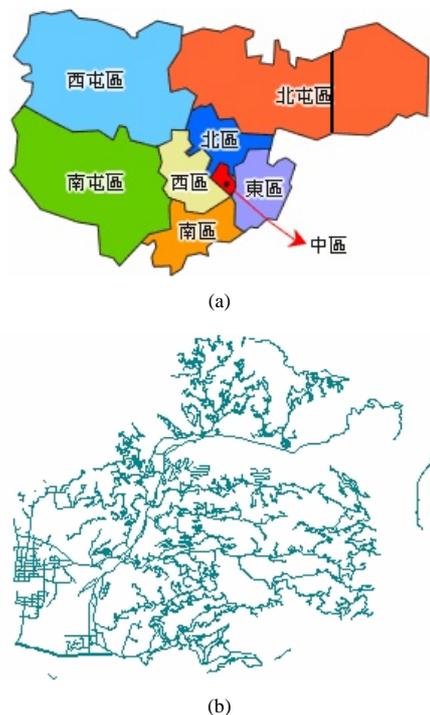


Figure 3. (a) Taichung map; (b) The right area of Beitun District, Taichung
图 3. (a) 台中市地图; (b) 北屯区右侧

和道路长度分布情形，都几乎遵守幂次律下降函数的趋势。下面我们分别讨论了这两个分布。

3.1. 道路连接数分布

以台南市为例，我们将道路累积的数目对每条道路与其它道路连接的数目做 log-log 图。在图 4 中显示出有一段近乎直线的区域范围含括大约 10^2 ，这是幂次律下降函数的特征。

依照方程式(1) $p_s(x) \sim x^{-\alpha+1} = x^{-\beta}$ ，我们在图 4 上画出累积分布函数其斜率为 $\beta = 1.50$ 。

我们将四个城市的资料整理如表 2，并在后面文章中陆续加以说明。

台中市的街道资料原有两笔，其中一笔不含北屯区的部分道路特殊区域，从图 5 的实线(全部资料)和粗虚线(不含北屯区部分资料)的重合程度看来，不难发现是否考虑北屯区的特殊道路区域的道路连接数目，并不影响台中市的街道的特性。

此外图 5 中左下方细虚线是北屯区中道路特殊的区域单独的累积分布图，亦可以看出其大小的确不足以影响整个台中市的分布状况。

由于高雄市道路命名方式的不同，我们分别以第

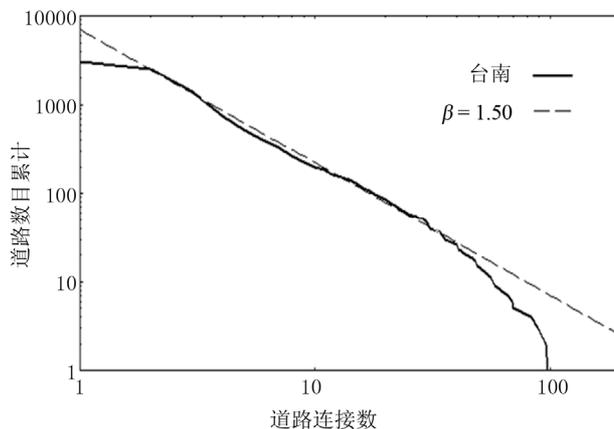


Figure 4. The cumulative distribution of Tainan street nodes
图 4. 台南市道路累积数对道路连接数图

Table 2. The scaling of the 4 urban streets
表 2. 都市街道特性比较

都市	道路连接数斜率(β)	道路长度斜率(β)
台北市	1.49	1.18
台中市	1.44	1.05
台南市	1.50	1.20
高雄市	1.52	1.27
高雄市*	1.43/3.90	1.00/2.15

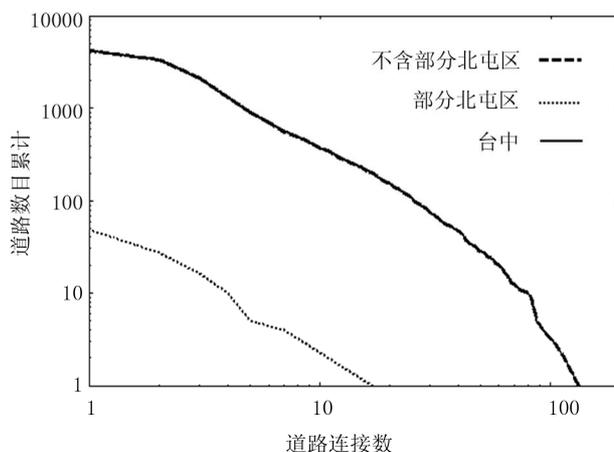


Figure 5. The cumulative distribution of Taichung street nodes
图 5. 台中市道路累积数对道路连接数图

一节所叙述之五条规则选取数据和人工合并道路数据两种方式来分析。图 6 中的实线为未经人工合并道路前之结果，虚线则为人工合并过后的结果。

合并前可以由实曲线看到两个不同的幂次律下降分布斜率(表 2 中标记星号“*”的数据)。文献上^[12]有少数城市，例如美国的 Philadelphia (1.8/4.2)、Laredo (1.7/4.2)和 San Francisco (1.7/3.4)有这样的分布性质。

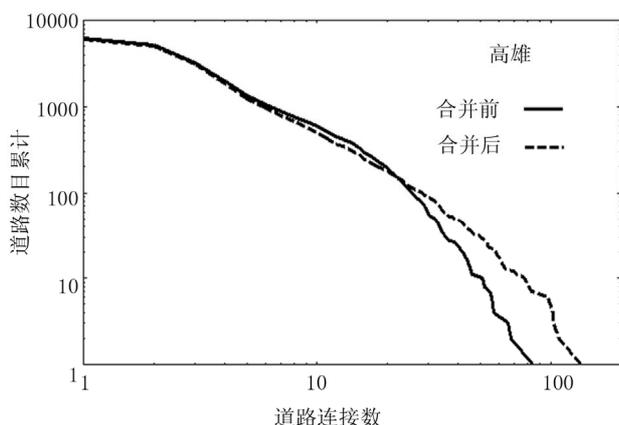


Figure 6. The cumulative distribution of Kaohsiung street nodes
图 6. 高雄市道路累积数对道路连接数图

但是高雄市在人工合并数据后即看不出这样的性质，我们未实际分析上述美国城市的数据，不知如此特性是否因同一种机制所引起。

由街道之间连接状态分析发现，大多数道路只与很少的道路连接，这也是社会物理学中常见的分布。图 7 合制四个都市的道路连接数分布图，其中高雄市选取道路合并后之数据作图(单斜率)，由表 2 的斜率值和图 7 曲线可以看出台湾都市的街道连接数的特性相似性很高。

3.2. 道路长度分布

图 8 是台南市道路累积的数目对每条道路长度的 log-log 图，一样可看出其遵守幂次率下降函数的趋势。

图 9 中看到台中市道路长度包含和不包含部分的北屯区道路之分布情形，其中细虚线为图 3(b)所示之小区的道路长度分布，令人惊讶地发现此区中竟包含了很多条长道路，因此使得分布图与不含此区者有明显的不同。仔细读取此区域中的长路图资发现，这些长的道路虽然路名相同却是分歧如树枝状，并非一般我们认知的“同一条”道路。虽然在前一小节中发现道路连接数不受此区影响，但由于地图数据上显示的不合理，使我们决定放弃此区的道路数据。

由于台中的道路长度特性与其它都市差异性较大(见表 2)，仔细观察可以看出，与其它都市相比，台中的确不符合单一幂次律下降函数。在图 10 上比对其曲线发现，其完全不似高斯分布(Gaussian distribution)，而是介于对数正则分布(Lognormal distribution)和幂次律下降分布之间，虽较其它都市不似幂次律下

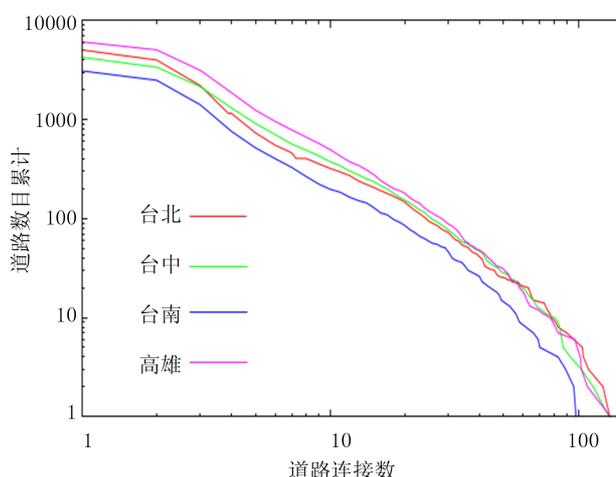


Figure 7. The cumulative distribution of the 4 cities street nodes
图 7. 四个都市道路累积数对道路连接数图

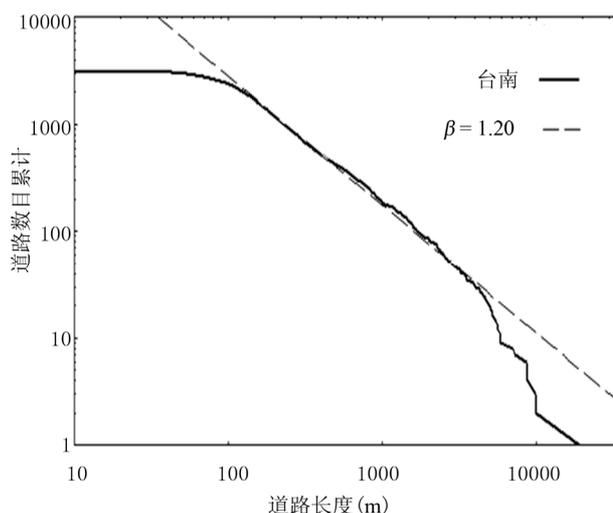


Figure 8. The cumulative distribution of Tainan street length
图 8. 台南市道路累积数对道路长度图

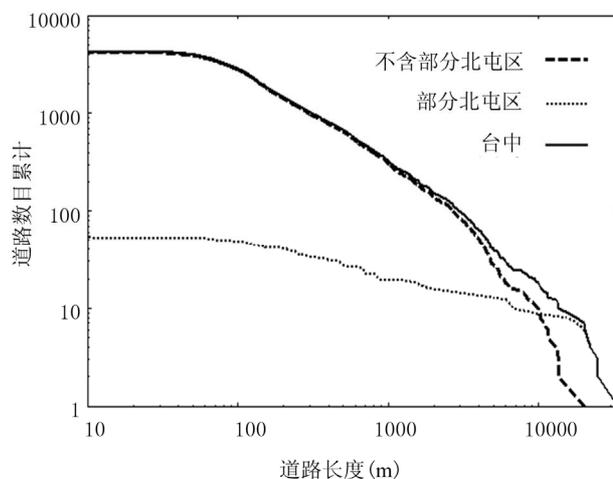


Figure 9. The cumulative distribution of Taichung street length
图 9. 台中市道路累积数对道路长度图

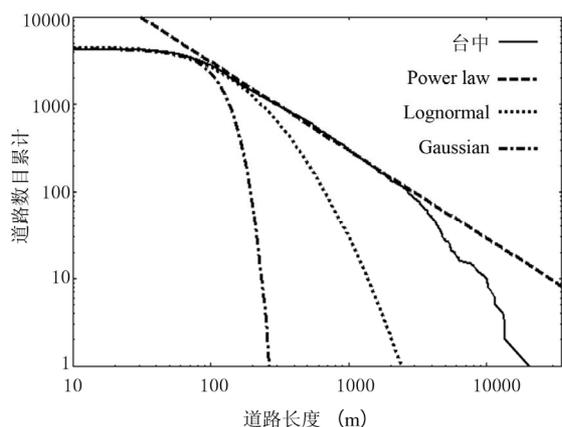


Figure 10. The scaling of Taichung street length
图 10. 台中市道路长度特性分析

降分布，但是长尾现象还是存在的。

至于台中市街道长度特性与台湾其它都市的差异来自何种机制，是我们将来可以探讨的议题。

图 11 显示高雄市的道路长度特性合并前后亦不同，合并前(实线)看似有两个不同的幂次律下降函数，在合并后(虚线)已不明显，两组数据皆揭示在表 2 中。

图 12 为四个都市道路累积的数目对道路长度图。由此图看起来台湾都市的道路长度分布很类似，大多数的道路长度不长。另外由表 2 可以看出长度累积分布图的斜率并不相近，此由图 12 中四个都市曲线交错情形较连接数图(图 7)明显，亦可看出端倪。

3.3. 道路连接数与道路长度的关联

我们已经发现，台湾都市大多数的道路长度不长，大多数的道路与其它道路的连接数不多，最后我们讨论道路连接数与道路长度的关联。

图 13 至图 16 各是四个都市道路长度对道路连接数作图。我们发现四个都市道路长度和连接数都呈现线性关系的趋势。

根据相关系数方程式

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n x'_i y'_i}{n-1} \quad (2)$$

其中 n 是道路数目， x' 和 y' 分别为道路连接数和道路长度的标准化数据。

表 3 列出四个城市的相关系数，当相关系数 $r > 2/3$ 时称两变量间高度正相关，我们发现台湾道路连接数和道路长度的正相关很强。逻辑上长的道路会有较多的节点之性质在此统计分析上得到了证实。

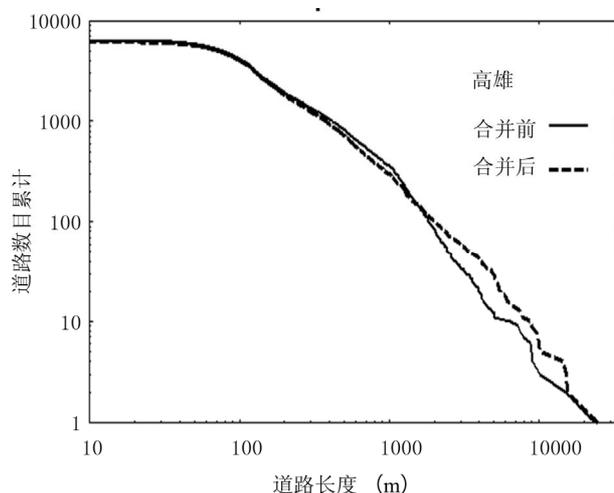


Figure 11. The cumulative distribution of Kaohsiung street length
图 11. 高雄市道路累积数对道路长度图

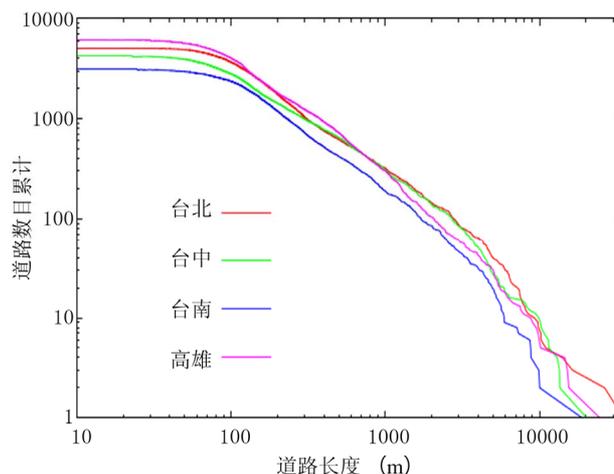


Figure 12. The cumulative distribution of the 4 cities street length
图 12. 四个都市道路累积数对道路长度图

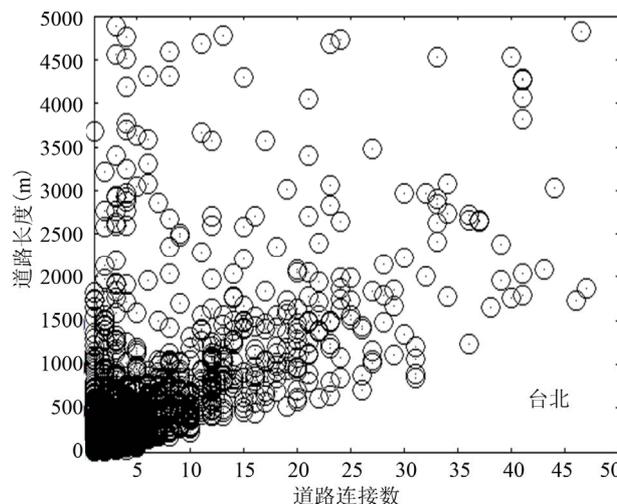


Figure 13. The street length vs the number of Taipei street nodes
图 13. 台北市道路长度与连接数关系图

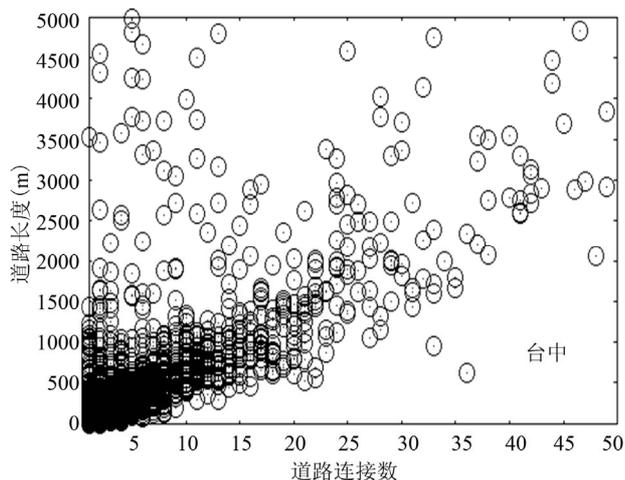


Figure 14. The street length vs the number of Taichung street nodes
图 14. 台中市道路长度与连接数关系图

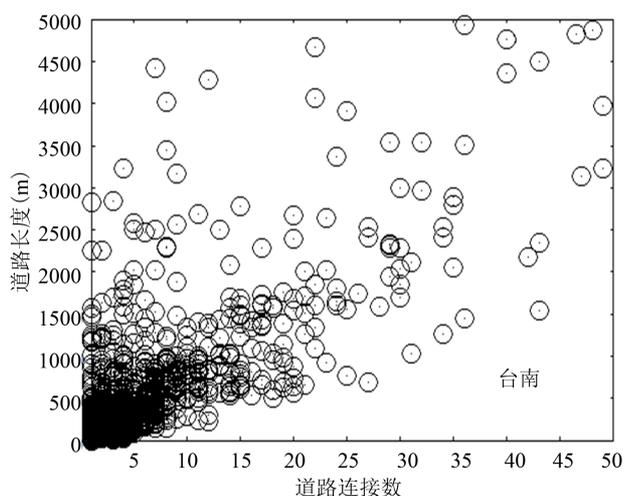


Figure 15. The street length vs the number of Tainan street nodes
图 15. 台南市道路长度与连接数关系图

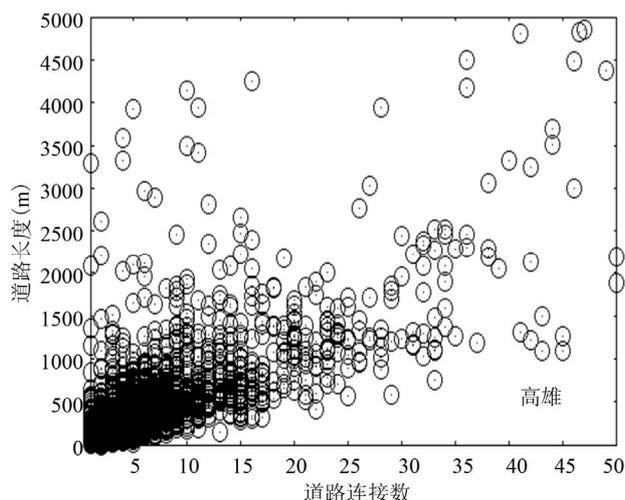


Figure 16. The street length vs the number of Kaohsiung street nodes
图 16. 高雄市道路长度与连接数关系图

Table 3. The correlation coefficients between a street length and its nodes in the 4 cities
表 3. 四个都市的道路长度和连接数之相关系数

都市	r
台北市	0.614
台中市	0.708
台南市	0.702
高雄市	0.717

台北市的相关系数较其它都市低，与台北市的盆地地形有关。检查台北市数据发现有几条很长的道路与其它道路连接数很少，都分布在台北市周围的山区中。这些数据记录在图 13 的左上角。很明显在图 15 台南市和图 16 的高雄市就没有这样的数据。

文献^[10]中提到计划性都市不像自组织都市具有无尺度性质。台湾的四个都市看来都具有无尺度性质，因此我们无法验证其理论，可能台湾的这四个都市，都不算计划性都市。我们将陆续完成台湾其它都市的街道标度性质，亦或可以验证此理论。

4. 总结

我们完成了台湾四个主要都市的街道网络统计分析。在道路连接数与道路长度的累积分布函数图中，均看到了长尾现象。这些结果与文献中^[8-13]其它国家的城市结果相符。

5. 感谢

感谢中国文化大学地理系高庆珍教授在地理信息系统的使用以及地理系在地图数据提供上的协助。

参考文献 (References)

- [1] D. J. Watts, S. H. Strogatz. Collective dynamics of "small-world" networks. Nature, 1998, 393(6684): 440-442.
- [2] M. E. J. Newman, D. J. Watts. Renormalization group analysis of the small-world network model. Physics Letters A, 1999, 263: 341-346.
- [3] M. Buchanan. 隐藏的逻辑[M]. 台北: 天下文化出版社, 2007.
- [4] P. Ball. 用物理学找到美丽新世界(Critical Mass) [M]. 台北: 木马文化出版社, 2008.
- [5] M. Batty, P. Longley. Fractal cities: A geometry of form and function. New York: Academic Press, 1994.
- [6] 台湾内政部户政司网站. 台湾行政区划改制前[URL], 2009. <http://www.ris.gov.tw/>
- [7] 我们所使用的 Geographic Information System(GIS)是由中国文化大学数位地球研究中心支援, 版本为 ArcGIS 9.3.
- [8] S. Porta, P. Crucitti and V. Latora. The network analysis of urban streets: A dual approach. Physica A, 2006, 369(2): 853-866.
- [9] S. Porta, P. Crucitti and V. Latora. The network analysis of urban

- streets: A primal approach. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2006, 33(5): 705-725.
- [10] P. Crucitti, V. Latora and S. Porta. Centrality measures in spatial networks of urban streets. *Physical Review E*, 2006, 73: 036125-1-036125-5.
- [11] M. Barthélemy, A. Flammini. Modeling urban street patterns. *Physical Review Letters*, 2008, 100(13): 138702-1-138702-4.
- [12] B. Jiang. A topological pattern of urban street networks: Universality and peculiarity. *Physica A*, 2007, 384: 647-655.
- [13] A. P. Masucci, D. Smith, A. Crooks and M. Batty. Random planar graphs and the London street network. *The European Physical Journal B*, 2009, 71(2): 259-271.