

都市異速增長規律之動態過程及啟示

臺灣都市區域供給網絡的經驗研究

Dynamics and Planning Implications
for Allometric Scaling Law
between Urban Supply Networks and
Taiwan Urban Areas

黃仲由*

賴世剛**

Jhong-You Huang

Shih-Kung Lai

Abstract

The past series of studies on allometric growth law for urban supply networks verifies and confirms a common mathematical model across different historical, geographical and socio-economic conditions. However, the previous literature has disregarded the trajectory of allometric exponents in the evolution of cities, and has neither provided dynamic descriptions nor explored trends over time. Furthermore, the literature has not measured or clarified effect of interactions among individual cities in a network with the collective growth phenomenon in common interaction of maintaining networks. Therefore, planners are still unable to exploit the potential mechanisms or underlying generic principles of individual cities in organic and allometric process to improve human settlements, urban environment and city

* 國立臺北大學不動產與城鄉環境學系博士，通訊作者 (e-mail: jhongyouhuang@gmail.com)

Ph.D., Department of Real Estate and Built Environment, National Taipei University, Corresponding Author.

** 上海同濟大學建築與城市規劃學院教授暨國立臺北大學不動產與城鄉環境學系兼任教授

Professor, College of Architecture and Urban Planning, Tongji University and Adjunct Professor, Department of Real Estate and Built Environment, National Taipei University.

design. This study investigates and verifies existing statistical data (Urban and Regional Development Statistics) in Taiwan from 1991 to 2010 based on log-linear forms of allometric growth and grey incidence analysis (grey sequences), to bridge the gap of knowledge in the past literature. This finding indicates the following conclusions: (1) that an allometric scaling law of self-organization and self-similarity of individual cities is emerging in Taiwan; (2) that the allometric exponents of various supply systems change over time, unlike immutable biological rhythms; (3) that the urban supply systems show non-linear allometric growth, rather than linear as in traditional planning practice; (4) that the population scale of a city does not affect allometric scaling law of urban supply networks, (5) and a close relationship exists between political or economic status of individual cities and influence of individual cities affecting the allometric scaling law of urban supply networks.

Keywords: urban development, urban growth, allometric scaling law, allometric exponent, grey incidence analysis.

摘 要

環顧過去一系列關於都市供給網絡的異速增長規律 (allometric scaling law) 的研究，其最大貢獻在於重複地確認一個跨越不同住居歷史條件、不同自然地理環境與不同經濟發展水準的數學通用模式，來客觀地檢測與定量地預期個別國家或個別區域內的都市發展與都市增長究竟「會如何」或「將如何」改變都市之實質環境。但過去文獻卻忽略了異速增長規律應用於都市發展過程時所可能蘊藏的變化和軌跡，從而缺乏對於都市供給次系統的異速增長指數 (allometric exponent) 在連續時刻點之動態探查。除此之外，既有文獻亦未曾考慮眾多系統相關的都市個體，與都市個體所共同突現的異速增長指數之間的同步變化程度或主次關係，以致目前仍無法進一步認識眾多系統相關的都市個體，在有機的和有組織的異速增長過程裡所潛藏的關聯性和基本機理，並因此缺乏相對應的都市個體層次的規劃啟示與指導意涵。

研究擬根據臺灣地區自 1991 年至 2010 年之既有統計數據集 (Urban and Regional Development Statistics)，藉由異速增長規律的對數線性形式執行數據擬合與檢測，並結合灰色關聯分析之序列比較結果，試圖彌補這些在過去文獻所未曾深入的研究議題。研究結果發現：(一) 臺灣眾多都市個體的人口規模與其廣泛類別的供給變量，確實可在保有良好的擬合配適度的前提下，共同突現出可類比生物物種的與自相似的異速增長關係；(二) 當臺灣的都市個體的人口規模改變，則其所伴隨的廣泛類別的供給變量，幾乎皆是非線性的異速增長 (allometry)，而非傳統規劃或實務操作所預設的和認知的線性增長；(三) 本研究內容所掌握的和檢測的各種都市供給變量，其異速增長指數普遍隨時間推進而波動，並非如同生物節奏般地亙古不變，當然亦不存在固定的異速增長指數 (如 Kleiber's Law)；(四) 臺灣都市個體的人口規模大小，以及臺灣都市個體對於集體層次的都市供給網絡的異速增長規律的關聯強弱，兩者之間並沒有必然關係；(五) 臺灣都市個體的政治經濟分量，以及臺灣都市個體對於集體層次的都市供給網絡的異速增長規律的關聯程度，兩者之間卻極可能關係非常緊密。

關鍵字：都市發展、都市增長、異速增長規律、異速增長指數、灰色關聯分析

前言

關於異速增長規律的應用及異速增長現象的機理探討，在近代科學發展的頻譜中（如複雜科學、區域科學、生命科學、物理科學等）一直扮演著核心的角色（Barenblatt 2003; Chave and Levin 2003; Pumain 2006; Cristelli, Batty, and Pietronero 2012; Stumpf and Porter 2012; Batty 2013a），其核心構想或許可追溯至 Galileo Galilei (1564-1642) 在 1638 年著作《*Dialogues Concerning Two New Sciences*》所提出的開創性概念——平方立方律 (square-cube law)(West and Grigolini 2011; Buonanno 2014)。Galileo Galilei 當時強調，若以相同縮放因子 (scaling factor) 整體擴大生物之骨骼、軀幹甚至是非生物之柱狀體，則理論上其重量將會依照縮放因子的立方比例增長，但其支撐力的來源（即截面積）卻僅以縮放因子的平方比例增加——該幾何通則意味著結構體的截面積必須不成比例地 (disproportionately) 擴增，或者加強組成材質的抗張力及壓縮力，才能繼續維持其結構的支撐強度並避免突然地崩潰（West 2006; Fisher 2011）。故一旦生物體積量級以一定比例增長，為滿足相應的支撐功能，則其股骨 (femur diameter) 自然必須供給更大於其體積增長比例地厚實 (proportionally thicker)(Bergstrom and Dugatkin 2012)。

前掲描述的股骨尺寸與體重之間的生物增長模式與非線性比例關係，即異速增長律 (allometric scaling law) 的實例之一 (Bonner 2006)。實際上，許多重要的生物基礎生理特徵量與生物體重間同樣亦存在類似的異速增長規律，譬如：新陳代謝率與心跳頻率等 (Schmidt-Nielsen 1984)，而最著名者即 Max Rubner 於 1883 年藉由單一生物物種 (seven different-sized dogs) 與 Max Kleiber 於 1932 年根據包含人類在內的大量生物物種進行實驗量測後所提出的新陳代謝率 (basal metabolic rate) 與體重分別呈接近 2/3 與 3/4 的冪次比例關係 (Hoppeler and Weibel 2005; Whitfield 2006)。其中，Max Rubner 初步提出之 2/3 縮放指數 (scaling exponent)，近似於生物表面積與體積之間的理想幾何縮放，至於 Max Kleiber 所獲得的 3/4 縮放指數則表示隨生物體積量級擴大，其每單位表面積散發的熱能將更甚於表面積規則的預期，反言之，這同時也代表生物體的自然構造與設定竟比簡單幾何 (the surface rule) 所預期的還要更消耗能量與食糧 (Whitfield 2006)。爾後，該冪次比例關係的適用範圍與生物多樣性，因相關研究者的持續推展而得到擴充——由分子和細胞內的基本單位層次（例如：支原體，Mycoplasma）到最龐大的有機生物個體層次（例如：藍鯨，Blue whale），從至少超過 21 個體積量級的生物群體裡，歸納總結其新陳代謝率 (BMR) 皆服從 3/4 冪律法則 (Kleiber's 3/4-power law for the metabolic rate) (West and Brown 2005; Whitfield 2006)。

在最近期的一系列研究中，Christian Kühnert、Dirk Helbing、Geoffrey B. West、José Lobo 與 Luis M. A. Bettencourt 等學者及其研究團隊（如 Santa Fe Institute, SFI）則發現經擴展實驗範圍後的生物異速增長規律，不僅通用已知的與幾乎完整的生物體積的量綱之外（如 Kleiber's Law），竟亦可延伸應用於規模更大且更加複雜的都市體系及眾多都市個體（Kühnert, Helbing, and West 2006; Bettencourt, Lobo, and Strumsky 2007; Bettencourt et al. 2007; Helbing et al. 2009; Lobo et al. 2013）。即是說，各種都市實質環境裡的供給變量（如電力或水利能源供給都市的運作與機能，設定為 Y ）和諸多規模大小有別的都市個體（依據都市人口數來衡量都市規模，設定為 N ），若分別被類比為生物有機體之基礎生理特徵量（如前述之股骨直徑或尺寸供給生物體的整體構造與支撐功能）和各種體積量級的生物物種，則我們可在滿足良好的配適度 (goodness of fit) 的前提下，藉由異速增長規律 (allometric scaling law) 適當地繪製

及展現其增長的非線性比例關係與尺度變化（請參照數式 1 與圖 1）：

$$Y(t)=Y_0[N(t)]^\beta \quad (1)$$

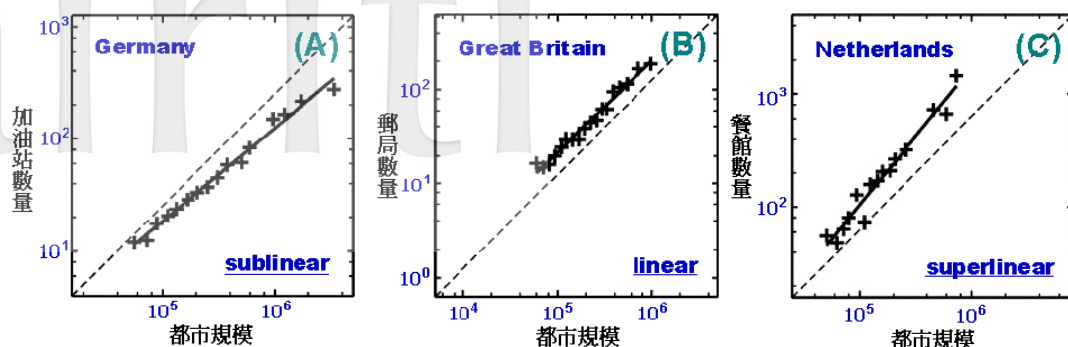
為便於擬合 (fitting) 都市實質環境裡的供給來源或特徵量時，以相對簡潔的線性形式表達，兼之，讓數值散布的間距更易於辨析 (Khare and Lachowska 2015)，故一般會藉由自然對數轉換，將幂律關係式（請參照數式 1）由原先的指數非線性形態改寫為對數線性形態（請參照數式 2）—其中，參數 β 即代表異速增長指數 (allometric exponent; scaling exponent; allometric slope)，參數 N 即代表都市規模，參數 Y 即代表都市實質環境裡的供給變量或特徵量（如 Kühnert, Helbing, and West 2006），而參數 t 則代表已掌握的次級資料所對應之時間點，至於參數 Y_0 則為正規化常數 (normalization constant)：

$$\ln Y(t) = \ln Y_0 + \beta \ln(N(t)) \quad (2)$$

數式 1 與數式 2 兩函數可直觀理解為：當都市規模 N 逐漸擴大，相對應的供給來源或特徵量 Y 亦必然隨之遞增，但其遞增或擴大的幅度卻受到參數 β 值（即異速增長指數）所限制。當 $\beta=1$ 時，表示都市供給次系統與都市規模之間構成單純的線性關係，也就是等速增長 (isometry)，即都市供給次系統的增長速度與都市規模的增長速度維持平衡穩定，譬如過去研究指出：都市供給次系統中的醫院數量、藥局數量、郵局數量、病床數量與家計用水量的增長皆與都市規模的增長維持或接近均衡比例關係（請參照圖 1B，以英國各都市之郵局數量為例）。當 $\beta<1$ 時，表示都市供給次系統與都市規模之間構成非線性的次線性關係，也就是負向的異速增長 (negative allometry)，即都市供給次系統的增長速度滯後於都市規模的增長速度，譬如過去研究指出：都市供給次系統中的加油站數量、汽油銷售量與汽車經銷商數量的增長速度皆滯後於都市規模的增長速度（請參照圖 1A，以德國各都市之加油站數量為例）。當 $\beta>1$ 時，表示都市供給次系統與都市規模之間構成非線性的超線性關係，也就是正向的異速增長 (positive allometry)，即都市供給次系統的增長速度超前於都市規模的增長速度，譬如過去研究指出：都市供給次系統中的醫生數量、餐廳數量與總用電量的增長速度皆超前於都市規模的增長速度（請參照圖 1C，以荷蘭各都市之餐廳數量為例）。

如圖 1 所顯示，在最單純的線性增長的情況下 (linear scaling; $\beta=1$)，都市供給次系統是以均衡的速度隨都市規模而增長，也就是說，都市發展規模越大其相對應的供給來源的數量或規模當然也越大，但每個人所擁有的、所需求的或被配給的份額卻將大致維持不變—該增長傾向隱喻都市規模增長並不影響都市供給次系統的人均度量。而在非線性的次線性增長的情況下 (sub-linear scaling; $\beta<1$)，則都市發展規模越大其相對應的供給來源的數量或規模亦必然越大，但每個人所擁有的、所需求的或被配給的份額實際上卻將越少—該增長傾向隱喻都市供給次系統的人均度量是隨都市規模增長而遞減。至於在非線性的超線性增長的情況下 (super-linear scaling; $\beta>1$)，則都市發展規模越大其相對應的供給來源的數量或規模同樣必然越大，且每個人所擁有的、所需求的或被配給的份額也將越多—該增長傾向隱喻都市供給次系統的人均度量是隨都市規模增長而遞增。

前述一系列研究的最大貢獻在於試圖提出且重複地確認一個跨越所有都市細部條件狀況（譬如：產業結構差異、住居歷史背景差異、自然地理環境差異、住居者行為決策差異、社會發展程度差異）的數學通用模式，來客觀地檢測與定量地預期個別國家或個別區域內（譬如：France, Germany, U.S.,



資料來源：Kühnert, Helbing, and West (2006); Helbing et al. (2009)。

說明：(A)：次線性關係 (sub-linear)；(B)：線性關係 (linear)；(C)：超線性關係 (super-linear)。

圖 1 都市供給次系統與都市規模的等速或異速增長關係

Fig. 1. Examples of supply systems with (A) sub-linear, (B) linear, and (C) super-linear scaling.

China, Great Britain, Italy, Spain, The Netherlands) 的都市發展或都市增長，究竟「會如何」或「將如何」改變都市之實質環境 (Kühnert, Helbing, and West 2006; Bettencourt et al. 2007; Bettencourt, Lobo and West 2008; Helbing et al. 2009)，進而實現過去傳統機械化世界觀和還原論思維支配下的都市發展概念所無法提供的深刻洞察。

然而，這樣的數學通用模式的分析基礎，多數是建構在間斷年度時刻點甚至是單一年度時刻點之檢測，意圖將都市供給網絡的異速增長規律，默認為或直接類比為自然生物節奏 (biological rhythm) 般的亙古不變 (如 Kleiber's Law 或 Rubner's Law)，忽略了異速增長規律應用於都市進化過程時所可能蘊藏的變化和軌跡，從而缺乏都市供給次系統的異速增長指數 (allometric exponent) 在連續年度時刻點之動態探查 (dynamic exploration)。

再者，既有文獻大多數是偏重在確認該數學通用模式的普遍性、適用性或決定性，但對於眾多系統相關的都市個體 (urban entities)，與其集體突現的異速增長指數 (allometric exponent) 之間的同步變化程度或主次關係，卻仍未曾觸及—以致目前仍無法進一步認識眾多系統相關的都市個體，在有機的和有組織的異速增長過程裡所潛藏的關聯性和基本機理，並因此缺乏相對應的都市個體層次的規劃啟示與明確積極的指導意涵。

為了彌補過去文獻所未曾深入的第一個研究議題，本研究擬擷取臺灣地區自 1991 年至 2010 年共計二十個連續年度時刻點之既有統計數據集 (Urban and Regional Development Statistics)，同樣藉由異速增長規律之對數線性形式 (如數式 2)，來擬合及檢測臺灣眾多都市個體單元與其廣泛類別的都市供給次系統的映射量，究竟能否在保有良好的擬合配適度的前提下，共同突現出可類比生物有機體的與自相似的異速增長關係，進而檢視及探索臺灣都市供給網絡的異速增長指數在連續年度時刻點所可能展現之動態變化。

承上，為了彌補過去文獻所未曾深入的第二個研究議題，本研究擬將擬合檢測時所獲取的異速增長指數的歷年動態變化與都市個體單元的供給次系統的歷年發展情形，分別設定為系統特徵母序列

(reference sequence) 與相關因子序列 (relevant factor sequence) (Liu and Lin 2006; Liu, Fang, and Lin 2006; Deng 2010), 再通過灰色關聯度模型定量地分析和比較各個子相關因素對於母系統特徵的關聯程度。最後, 基於前揭灰色關聯度分析結果, 探究臺灣都市個體在集體層次的都市供給網絡的異速增長規律中的潛在機理和主要關聯個體。

據此, 全文整體架構包括第一部分之前言, 共計由五個部分所組成。作者在第二部分, 將應用異速增長規律之對數線性形式 (請參照數式 2), 對臺灣眾多都市個體的人口規模, 以及其廣泛類別的都市供給變量施行數據擬合, 並藉由該數據擬合結果, 揭示臺灣都市供給網絡在連續時刻點之動態變化; 第三部分則將先介紹數種不同分析途徑的灰色關聯度模型及其思路之後, 再利用第二部分所獲取之擬合數據集 (data sets), 結合灰序列生成方法及灰色關聯度模型, 分析和比較臺灣眾多都市個體單元與都市供給網絡的異速增長指數的同步變化程度或發展密切程度; 第四部分則將立基於第二部分與第三部分之分析內容, 進行一整合性的綜合討論和對話; 最後, 第五部分則將為前述之分析比較結果及重要研究發現, 提出總結、補充與未來政策建議。

臺灣都市供給網絡的異速增長規律

為彌補過去文獻所未曾深入的第一個研究議題, 本研究擬先擷取臺灣地區自 1991 年至 2010 年共計二十個連續年度時刻點之既有統計數據集 (Urban and Regional Development Statistics), 藉由異速增長規律之對數線性形式 (請參照數式 2), 對臺灣眾多都市的人口規模與其廣泛類別的都市供給變量, 施行連續年度期間之數據擬合一試圖確認臺灣眾多都市及其供給次系統, 究竟能否在保有良好擬合配適度的前提下 (Bettencourt, Lobo, and Strumsky 2007), 共同突現出可對比生物物種的與自相似的增長關係 (Brown and West 2000; Barenblatt 2003; Chave and Levin 2003), 繼而, 統整該連續年度期間之擬合數據, 補足過去對於都市供給次系統的異速增長規律 (指數) 所欠缺的動態探查。

在此, 必須特別補述的是, 目前相關文獻對於都市的定義, 事實上仍未凝聚足夠的共識, 而各國提供之公開查詢資料庫, 對於都市應涵蓋的範圍, 亦存在歧異 (Arcaute et al. 2015)。兼之, 由於都市層級的統計數據, 無論是取得或量測均非常不易 (Bettencourt, Lobo, and West 2009), 往往使得可利用的數據集, 幾乎多為非連續時刻點之間斷數值, 甚至是已嚴重缺失的零碎片段。故, 基於眾多現實條件限制以及考量既有文獻作法下, 本研究便斟酌排除年底家戶數與年底人口數相對較低之離島區域 (澎湖縣、金門縣、連江縣) 之後, 採用行政邊界所劃定的個體單元, 作為量化分析時的都市個體。

另一方面, 應再次重申的是, 本研究對於都市供給次系統的替代變量 (proxy variable) 的選取原則, 主要是從有限的次級資料來源當中, 盡可能地延續過去一系列提倡自然生物永續性並將都市隱喻為生物有機體 (scaling and biological metaphors for the city) 之相關研究 (如 Bettencourt et al. 2007; Bettencourt, Lobo, and West 2008; Helbing et al. 2009) 所熱衷關注的都市供給變量—譬如本研究選取的售電量、配水量、醫療從業人員數量、醫療設備數量與交通載具數量等關鍵都市供給變量, 乃負責供應都市的日常運作與基本機能, 如同生物肱骨或股骨等重要生物構件及其尺寸, 乃負責維繫生物體之生命型態與整體功能 (Prange, Anderson, and Rahn 1979; Schmidt-Nielsen 1984; Christiansen 1999)。

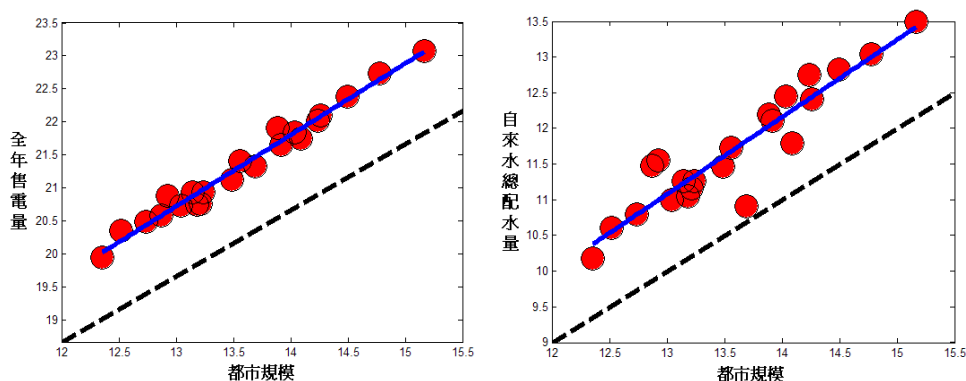
固然, 藉由行政邊界所劃定的個體單元 (individual components)(Kluger 2008), 可能同時隱含都市

區域 (urban areas) 的概念 (Fragkias et al. 2013)，且本文所選取的有限的替代變量或都市供給變量，亦無力涵蓋或代表特定的都市供給次系統，但無庸置疑地，本研究和最近期的一系列相關文獻，仍舊有反映和洞悉都市體系和其結構複雜性的具體價值 (Batty and Torrens 2005; Batty 2012)，特別是有助於理解實質存在的且無法透過簡單的都市個體或都市區域的聚合 (Holland 1998; Batty 2000; Anderson 2001) 來解析的都市異速增長現象。

(一) 都市能源供給系統—全年售電量、自來水總配水量

本研究從既有統計數據集所擷取與檢測的第一個映射量，為臺灣都市能源供給系統中的全年售電量 (annual consumption of electricity)，而檢測結果顯示，在不完全精確但保有一定良好的擬合配適度的前提下 (以 2010 年為例，如圖 2 所示)，該映射量與都市規模之間長期呈現超線性關係 (如圖 3 所示)。換言之，全年售電量的增長速度於 1991 年至 2010 年共計二十個年度期間內，普遍皆超前於都市規模的增長速度 (即 $\beta > 1$)，這同時也代表過去臺灣的都市集聚在電力資源的利用方面是較不經濟的 (agglomeration diseconomies) (Bettencourt et al. 2007; Batty 2008; Samet 2013)——當臺灣的都市規模一旦擴大或增長，則其實際所消耗的或所供給的電力資源的人均度量將會比單純的和預期的線性增長 (即 $\beta=1$) (Barenblatt 2003) 還要再更多出約 8%-18% (請參照圖 3 之歷年趨勢面積圖)。

本研究從既有統計數據集所擷取與檢測的第二個映射量，為臺灣都市能源供給系統中的自來水總配水量 (total water supply)，而檢測結果顯示，在不完全精確但保有一定良好的擬合配適度的前提下 (以 2010 年為例，如圖 2 所示)，該映射量與都市規模之間長期呈現超線性關係 (如圖 3 所示)。換言之，



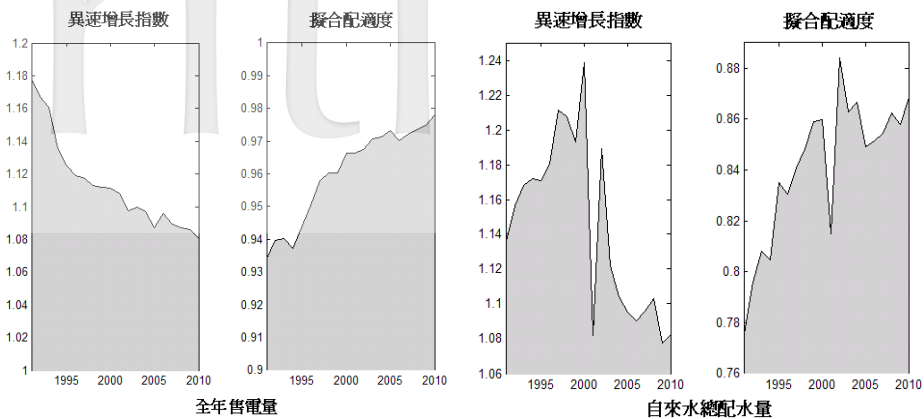
說明：(1) 2010 年臺灣都市之全年售電量對應其人口規模； $\beta=1.0806$ ； $R^2=0.9782$ (左圖)。

(2) 2010 年臺灣都市之自來水總配水量對應其人口規模； $\beta=1.0827$ ； $R^2=0.8686$ (右圖)。

圖 2 臺灣都市能源供給量與臺灣都市規模的異速增長關係

Fig. 2. Scaling results for energy quantities (Y) vs. metropolitan population (N) in Taiwan.

自來水總配水量的增長速度於 1991 年至 2010 年共計二十個年度期間內，普遍皆超前於都市規模的增長速度 (即 $\beta > 1$)，這同時也代表過去臺灣的都市集聚在水利資源的利用方面是較不經濟的——當臺灣的都市規模一旦擴大或增長，則其實際所消耗的或所供給的自來水資源的人均度量將會比單純的和預期的線性增長 ($\beta=1$) 還要再更多出約 8%-24% (請參照圖 3 之歷年趨勢面積圖)。



說明：(1) 全年售電量對應其人口規模的異速增長指數 β 與擬合配適度 R^2 (左圖)。

(2) 自來水總配水量對應其人口規模的異速增長指數 β 與擬合配適度 R^2 (右圖)。

圖 3 臺灣都市能源供給量的異速增長指數與擬合配適度之歷年動態面積圖

Fig. 3. Area graphs of β and R^2 of metropolitan energy quantities in Taiwan from 1991 to 2010.

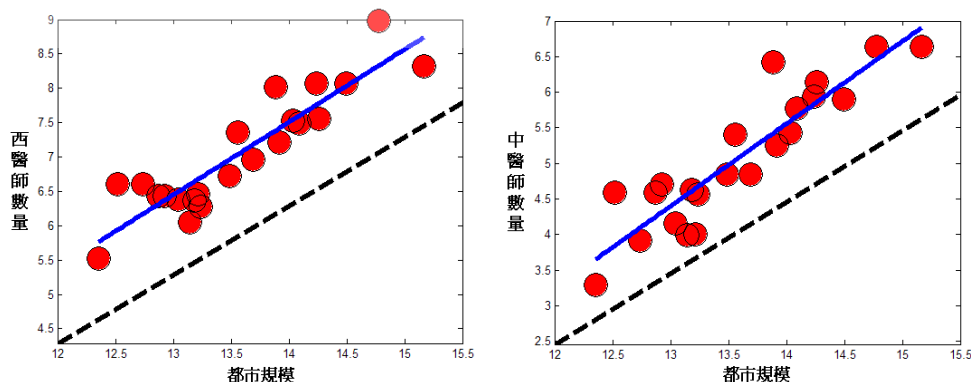
(二) 都市醫療供給系統—西醫師數量、中醫師數量、牙醫師數量、病床數量

本研究從既有統計數據集所擷取與檢測的第三個映射量，為臺灣都市醫療供給系統中的西醫師數量 (number of physicians)，而檢測結果顯示，在不完全精確但保有一定良好的擬合配適度的前提下 (以 2010 年為例，如圖 4 所示)，該映射量與都市規模之間長期呈現超線性關係 (如圖 5 所示)。換言之，西醫師數量的增長速度於 1991 年至 2010 年共計二十個年度期間內，幾乎皆超前於都市規模的增長速度 (即 $\beta > 1$)，這同時也代表過去臺灣的都市集聚在西醫師人力資源的利用或配置方面是較不經濟的 (Bettencourt et al. 2007; Batty 2008; Samet 2013)—當臺灣的都市規模一旦擴大或增長，則其實際所供給的或所伴隨的西醫師數量的人均度量將會比單純的和預期的線性增長 (即 $\beta=1$) (Barenblatt 2003) 還要再多出約 2%-9% (請參照圖 5 之歷年趨勢面積圖)。

本研究從既有統計數據集所擷取與檢測的第四個映射量，為臺灣都市醫療供給系統中的中醫師數量 (number of herb doctors)，而檢測結果顯示，在不完全精確但保有一定良好的擬合配適度的前提下 (以 2010 年為例，如圖 4 所示)，該映射量與都市規模之間長期呈現超線性關係 (如圖 5 所示)。換言之，中醫師數量的增長速度於 1991 年至 2010 年共計二十個年度期間內，幾乎皆超前於都市規模的增長速度 (即 $\beta > 1$)，這同時也代表過去臺灣的都市集聚在中醫師人力資源的利用或配置方面是較不經濟的—當臺灣的都市規模一旦擴大或增長，則其實際所供給的或所伴隨的中醫師數量的人均度量將會比單純的和預期的線性增長 (即 $\beta=1$) 還要再多出約 1%-19% (請參照圖 5 之歷年趨勢面積圖)。

本研究從既有統計數據集所擷取與檢測的第五個映射量，為臺灣都市醫療供給系統中的牙醫師數量 (number of dentists)，而檢測結果顯示，在不完全精確但保有一定良好的擬合配適度的前提下 (以 2010 年為例，如圖 6 所示)，該映射量與都市規模之間長期呈現超線性關係 (如圖 7 所示)。換言之，牙醫師數量的增長速度於 1991 年至 2010 年共計二十個年度期間內，普遍皆超前於都市規模的增長速

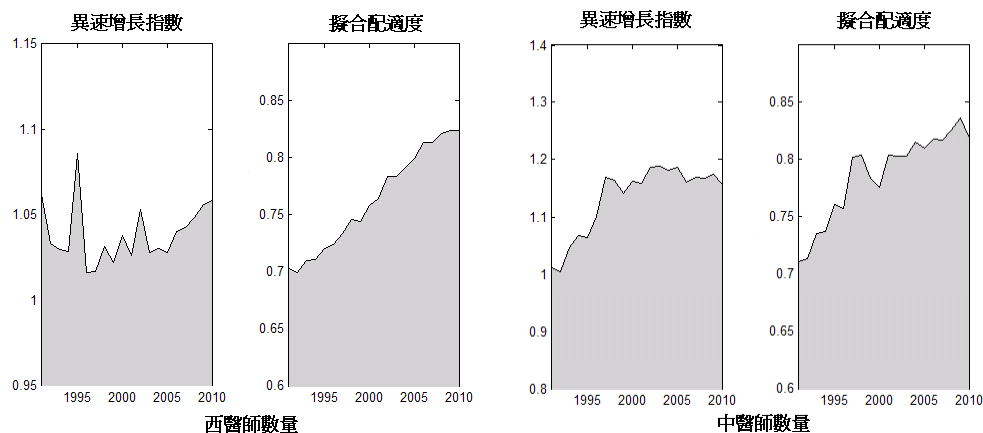
度 (即 $\beta > 1$)，這同時也代表過去臺灣的都市集聚在牙醫師人力資源的利用或配置方面是較不經濟的一當臺灣的都市規模一旦擴大或增長，則其實際所供給的或所伴隨的牙醫師數量的人均度量將會比單純的和預期的線性增長 (即 $\beta = 1$) 還要再更多出約 18%-25% (請參照圖 7 之歷年趨勢面積圖)。



說明：(1) 2010 年臺灣都市之西醫師數量對應其人口規模； $\beta=1.0583$ ； $R^2=0.8241$ (左圖)。
(2) 2010 年臺灣都市之中醫師數量對應其人口規模； $\beta=1.1569$ ； $R^2=0.8186$ (右圖)。

圖 4 臺灣都市醫療供給量與臺灣都市規模的異速增長關係

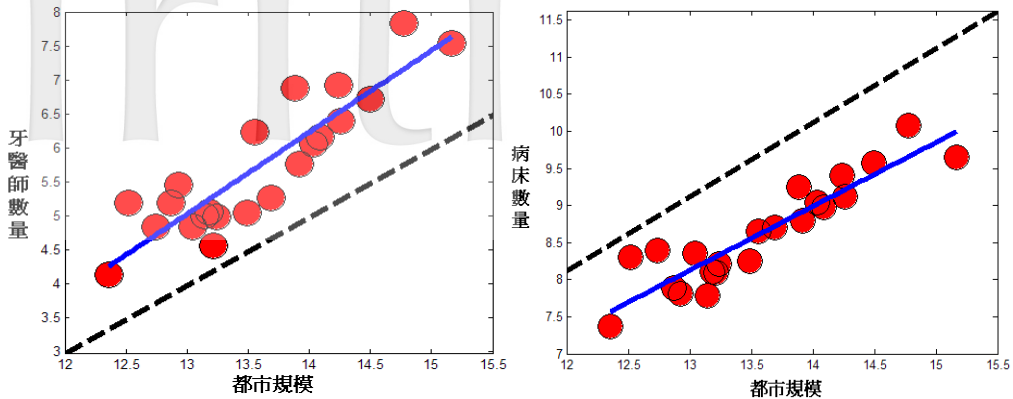
Fig. 4. Scaling results for medical quantities (Y) vs. metropolitan population (N) in Taiwan.



說明：(1) 西醫師數量對應其人口規模的異速增長指數 β 與擬合配適度 R^2 (左圖)。
(2) 中醫師數量對應其人口規模的異速增長指數 β 與擬合配適度 R^2 (右圖)。

圖 5 臺灣都市醫療供給量的異速增長指數與擬合配適度之歷年動態面積圖

Fig. 5. Area graphs of β and R^2 of metropolitan medical quantities in Taiwan from 1991 to 2010.

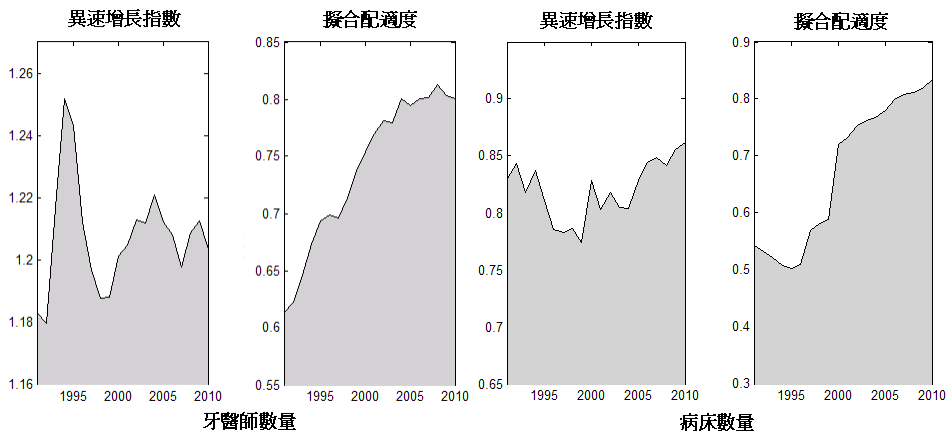


說明：(1) 2010 年臺灣都市之牙醫師數量對應其人口規模； $\beta=1.2036$ ； $R^2=0.8007$ (左圖)。

(2) 2010 年臺灣都市之病床數量對應其人口規模； $\beta=0.8615$ ； $R^2=0.8350$ (右圖)。

圖 6 臺灣都市醫療供給量與臺灣都市規模的異速增長關係

Fig. 6. Scaling results for medical quantities (Y) vs. metropolitan population (N) in Taiwan.



說明：(1) 牙醫師數量對應其人口規模的異速增長指數 β 與擬合配適度 R^2 (左圖)。

(2) 病床數量對應其人口規模的異速增長指數 β 與擬合配適度 R^2 (右圖)。

圖 7 臺灣都市醫療供給量的異速增長指數與擬合配適度之歷年動態面積圖

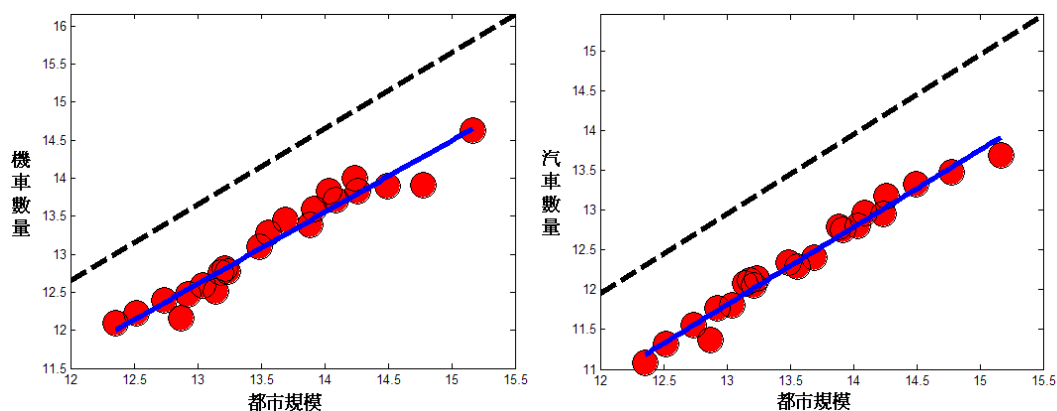
Fig. 7. Area graphs of β and R^2 of metropolitan medical quantities in Taiwan from 1991 to 2010.

本研究從既有統計數據集所擷取與檢測的第六個映射量，為臺灣都市醫療供給系統中的病床數量 (number of hospital beds)，而檢測結果顯示，在不完全精確但保有一定良好的擬合配適度的前提下 (以 2010 年為例，如圖 6 所示)，該映射量與都市規模之間長期呈現次線性關係 (如圖 7 所示)。換言之，病床數量的增長速度於 1991 年至 2010 年共計二十個年度期間內，普遍皆滯後於都市規模的增長速度

(即 $\beta < 1$)，這同時也代表過去臺灣的都市集聚在病床設備資源的利用或配置方面是較為經濟的 (agglomeration economies)——當臺灣的都市規模一旦擴大或增長，則其實際所供給的或所伴隨的病床數量的人均度量將會比單純的和預期的線性增長 (即 $\beta=1$) 還要再節省約 14%-23% (請參照圖 7 之歷年趨勢面積圖)。

(三) 都市交通供給系統—機車數量、汽車數量

本研究從既有統計數據集所擷取與檢測的第七個映射量，為臺灣都市交通供給系統中的機車數量 (number of motorcycles)，而檢測結果顯示，在不完全精確但保有一定良好的擬合配適度的前提下 (以 2010 年為例，如圖 8 所示)，該映射量與都市規模之間長期呈現次線性關係 (如圖 9 所示)。換言之，機車數量的增長速度於 1991 年至 2010 年共計二十個年度期間內，普遍皆滯後於都市規模的增長速度 (即 $\beta < 1$)，這同時也代表過去臺灣的都市集聚在機車載具資源的利用方面是較為經濟的 (agglomeration economies)(Bettencourt et al. 2007; Batty 2008; Samet 2013)——當臺灣的都市規模一旦擴大或增長，則其實際供給的或伴隨的機車數量的人均度量將會比單純的和預期的線性增長 ($\beta=1$) (Barenblatt 2003) 還要再節省約 5%-10% (請參照圖 9 之歷年趨勢面積圖)。



說明：(1) 2010 年臺灣都市之機車數量對應其人口規模； $\beta=0.9420$ ； $R^2=0.9495$ (左圖)。

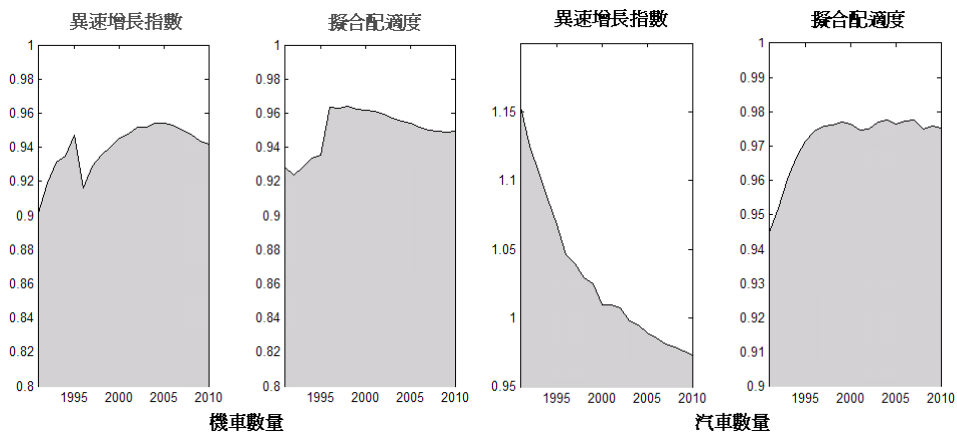
(2) 2010 年臺灣都市之汽車數量對應其人口規模； $\beta=0.9732$ ； $R^2=0.9752$ (右圖)。

圖 8 臺灣都市交通供給量與臺灣都市規模的異速增長關係

Fig. 8. Scaling results for vehicle quantities (Y) vs. metropolitan population (N) in Taiwan.

本研究從既有統計數據集所擷取與檢測的第八個映射量，為臺灣都市交通供給系統中的汽車數量 (number of automobiles)，而檢測結果顯示，在不完全精確但保有一定良好的擬合配適度的前提下 (以 2010 年為例，如圖 8 所示)，該映射量與都市規模於研究期間內同時涵蓋了超線性、線性與次線性等三種增長關係 (請參照圖 9 之歷年趨勢面積圖)：(1) 在 1991 年-1999 年期間呈現超線性關係 ($\beta > 1$)——當臺灣的都市規模一旦擴大或增長，則其供給的或伴隨的汽車數量的人均度量將會比理想的和預期的線性增長，還要再更多出約 2%-15% (agglomeration diseconomies)；(2) 在 2000 年-2004 年期間則呈現線

性關係 ($\beta=1$)—當臺灣的都市規模一旦擴大或增長，則其供給的或伴隨的汽車數量的人均度量將會等於或逼近單純的和預期的線性增長 (proportionality)；(3) 在最近期之 2005 年-2010 年期間則逐漸趨向次線性關係 ($\beta<1$)—當臺灣的都市規模一旦擴大或增長，則其供給的或伴隨的汽車數量的人均度量將會比單純的和預期的線性增長還要再節省約 1%-3% (agglomeration economies)。



說明：(1) 機車數量對應其人口規模的異速增長指數 β 與擬合配適度 R^2 (左圖)。

(2) 汽車數量對應其人口規模的異速增長指數 β 與擬合配適度 R^2 (右圖)。

圖 9 臺灣都市交通供給量的異速增長指數與擬合配適度之歷年動態面積圖

Fig. 9. Area graphs of β and R^2 of metropolitan vehicle quantities in Taiwan from 1991 to 2010.

臺灣都市供給網絡的異速增長規律的灰色關聯度分析

延續先前章節討論與脈絡，實際上，既有文獻的共通分析模式 (Bettencourt's analysis)，不僅直接略過都市供給次系統的異速增長規律的動態探查之外 (請參照本文第二部分)，亦未曾考量眾多系統相關的都市個體，與都市個體所共同突現的異速增長指數之間的同步變化程度 (Liu and Lin 2006; Liu, Fang, and Lin 2006; Deng 2010)。反言之，既有文獻雖然已經累積諸多關於都市異速增長規律的調查 (請參照本文第一部分)，但是，對於決定或主導都市異速增長指數的內部相關子因素之主次順序和同步變化程度卻未曾觸及—以致目前仍無法進一步認識眾多系統相關的都市個體 (urban entities) 在有機的和有組織的 (Jacobs 1961) 異速增長過程裡所潛藏的關聯性和基本機理 (Batty 2008; Lai and Han 2014; Bettencourt 2013; Partanen 2015)，並因此缺乏相對應的都市個體層次的規劃啟示與指導意涵。

此處，有兩關鍵概念必須預先說明與釐清：(1) 異速增長指數 (β , allometric slope) 實質上即都市自組織網絡中 (West and Grigolini 2011) 的每個都市個體的供給變量與其對應的都市規模映射至雙對數座標 (double-logarithmic coordinates) 平面後，通過普通最小平方擬合所共同決定的擬合直線之斜率 (如圖2、圖4、圖6、圖8)。故，基於此觀點，將每個都市個體的供給變量在歷年時刻點之起伏變動 (internal

dynamics) 串聯後 (Helbing, Jost, and Kantz 2008)，本研究便視為有效的與直接的相關子因素序列；(2) 換句話說，由眾多系統相關的都市個體的供給變量所決定或主導的都市供給變量的異速增長指數，自然便應視為集體生成的母系統特徵或母系統行為，至於其歷年時刻點的變動情形或動態變化 (如圖 3、圖 5、圖 7、圖 9)，同理，本研究則設定為母系統特徵序列。

承上述設定，為彌補過去文獻所未曾觸及的研究議題，本節分析內容之安排，擬根據以下三個研究步驟依序展開：(1) 首先，簡明扼要地介紹數種不同分析思路的灰色關聯度模型－灰色累積生成關聯度模型、灰色相對關聯度模型、灰色綜合關聯度模型；(2) 以臺灣都市供給變量裡的西醫師數量為例，圖文解釋「灰色累積生成關聯度模型」的具體應用過程及其意涵；以臺灣都市供給變量中的機車數量為例，圖文解釋「灰色相對關聯度模型」的具體應用過程及其意涵；(3) 最後，配合前揭灰色累積生成關聯度模型、灰色相對關聯度模型、灰色綜合關聯度模型，定量地分析臺灣都市供給變量 (如本研究內容涵蓋之售電量、配水量、西醫師數量、中醫師數量、牙醫師數量、病床數量、機車數量、汽車數量)，與總體的都市供給變量的異速增長指數的同步變化程度和主次關係。此外，為精簡與節約圖表篇幅，後續圖表內容便按照數據來源 (Urban and Regional Development Statistics) 所陳列的次序及開頭英文字母來代表各個臺灣都市個體，以下內文將不再贅述 (請參照表 1)。

表 1 臺灣都市個體單元之次序與代號對照表

Table 1. The corresponding code of individual city in Taiwan Area.

代號	Area	地區別	代號	Area	地區別
01T	Taipei City	臺北市	12N	Nantou C.	南投縣
02K	Keelung Cit	基隆市	13Y	Yunlin C.	雲林縣
03H	Hsinchu City	新竹市	14K	Kaohsiung City	高雄市
04T	Taipei C.	臺北縣	15T	Tainan Cit	臺南市
05T	Taoyuan C.	桃園縣	16C	Chiayi City	嘉義市
06H	Hsinchu C.	新竹縣	17C	Chiayi C.	嘉義縣
07Y	Yilan C.	宜蘭縣	18T	Tainan C.	臺南縣
08T	Taichung City	臺中市	19K	Kaohsiung C.	高雄縣
09M	Miaoli C	苗栗縣	20P	Pingtung C.	屏東縣
10T	Taichung C.	臺中縣	21H	Hualien C.	花蓮縣
11C	Changhua C.	彰化縣	22T	Taitung C.	臺東縣

(一) 灰色關聯度分析模型

1. 灰色累積生成關聯度分析模型

灰色關聯分析的基本思路 (鄧聚龍 2002；劉思峰等 2010；劉思峰、謝乃明 2013；劉思峰、楊英傑、吳利豐 2014)，乃是根據構件、因素或子集的發展過程所構造的時間序列來明確與母系統特徵之間的聯繫與發展是否密切，亦即是說，相關因素子序列與系統特徵母序列在所有時刻點的同步變動程

度越高，或是其發展趨勢越相似，則相對應的關聯程度便就越大，反之便就越小。本研究擬應用灰色累積生成技術對系統特徵母序列與相關因子序列施行數據預處理，使累積生成處理後的相關因子序列和系統特徵母序列所蘊藏的積分特性或規律能夠被充分地揭示（曾波、張德海、孟偉 2013），進而完善及優化經典鄧氏灰色關聯模型（請參照數式 3 和數式 4）—其中， $X_0^{(1)}(k)$ 為經過一次累積生成之系統特徵母序列， $X_i^{(1)}(k)$ 為經過一次累加生成之相關因子序列，至於 ξ 則為分辨係數，其預設值通常設為 0.5，而本文之設定亦然。

$$\Gamma(x_0^{(1)}(k), x_i^{(1)}(k)) = \frac{\min_i \min_k |x_0^{(1)}(k) - x_i^{(1)}(k)| + \xi \max_i \max_k |x_0^{(1)}(k) - x_i^{(1)}(k)|}{|x_0^{(1)}(k) - x_i^{(1)}(k)| + \xi \max_i \max_k |x_0^{(1)}(k) - x_i^{(1)}(k)|} \quad (3)$$

$$\Gamma(x_0, x_i) = \left(\frac{1}{n} \right) \left(\sum_{k=1}^n \Gamma(x_0^{(1)}(k), x_i^{(1)}(k)) \right) \quad (4)$$

2. 灰色相對關聯度分析模型

承上述討論，灰色關聯度的分析途徑，除了透過累積生成及無量綱化處理後的灰生成序列（曾波、張德海、孟偉 2013）去判定相關因子序列與系統特徵母序列的關聯性之外，亦可應用基於相對於起始點的變化速率的灰色相對關聯度分析模型（劉思峰、謝乃明 2013；劉思峰等 2013）加以衡量—根據該模型定義：相關子序列經起始點零化後所獲取之變化速率，以及系統特徵母序列經起始點零化後所獲取之變化速率，若彼此越貼近（請參照數式 5、數式 6、數式 7），則其灰色相對關聯度便就越大，反之就越小（請參照數式 8）—其中， $X_0'^0(k)$ 為經過起始點零化之系統特徵母序列， $X_0'^0(n)$ 則為經過起始點零化之系統特徵母序列中的最末個元素值， $X_i'^0(k)$ 為經過起始點零化之相關因子序列， $X_i'^0(n)$ 則為經過起始點零化之相關因子序列中的最末個元素值。

$$|S'_0| = \left| \sum_{k=2}^{n-1} x_0'^0(k) + \frac{1}{2} x_0'^0(n) \right| \quad (5)$$

$$|S'_i| = \left| \sum_{k=2}^{n-1} x_i'^0(k) + \frac{1}{2} x_i'^0(n) \right| \quad (6)$$

$$|S'_i - S'_0| = \left| \left(\sum_{k=2}^{n-1} x_i'^0(k) - x_0'^0(k) \right) + \frac{1}{2} (x_i'^0(n) - x_0'^0(n)) \right| \quad (7)$$

$$\Phi(x_0, x_i) = \frac{1 + |S'_0| + |S'_i|}{1 + |S'_0| + |S'_i| + |S'_i - S'_0|} \quad (8)$$

3. 灰色綜合關聯度分析模型

承上述討論，為更全面地和更合理地地表徵序列之間的聯繫、發展或者關聯強弱，本研究擬先求取灰色累加生成關聯度（給定為 Γ ）以及灰色相對關聯度（給定為 Φ ）之後，再聯合定義為灰色綜合關聯度（synthetic degree of grey incidence）（給定為 Ω ）。其中， θ 值可視需求或側重，適當地調整，而本文按

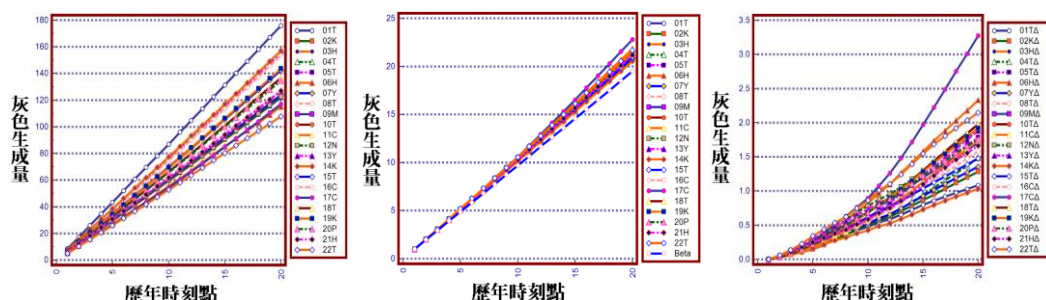
照一般設定，給定 θ 值為 0.5，後續圖表內文將不再複述。

$$\Omega(x_0, x_i) = \theta \cdot \Gamma(x_0, x_i) + (1 - \theta) \cdot \Phi(x_0, x_i) \quad (9)$$

(二) 灰色關聯度分析模型之釋例

1. 灰色累積生成關聯度分析模型之釋例

前揭介紹的基於一次累積生成之灰色關聯分析模型（請參照數式 3 和數式 4），若以臺灣都市供給變量中的西醫師數量為例，則其具體應用過程和意涵可解讀如下：(1) 如本節前言所述，先將臺灣都市個體單元的西醫師數量在研究期間內的發展情形串聯後（請對照圖 14 左側組圖），設定為各個相關子序列，並將已掌握的集體層次的西醫師數量的異速增長指數之歷年動態變化，設定為系統特徵母序列；(2) 透過累積生成技術，把該相關子序列的分段連續折線轉換為相對平滑的曲線或直線，令表象複雜的原始數據所蘊藏的發展態勢能夠被充分地揭示（請對照圖 10 左側組圖）；(3) 加入同樣經累積生成處理後的系統母序列之後，同時對母序列及子序列實行初值化處理，以消除序列之量綱和數量級並使其具備可比性（請對照圖 10 置中組圖）；(4) 數據信息處理結果經由可視化後，便如圖 10 右側組圖所示一例如其中可見：高雄市（對應線段 14KΔ）和臺北市（對應線段 01TΔ）的西醫師供給量，和集體層次的西醫師供給量的異速增長指數，在大部分的序列時刻點之差異為最小，亦即同步變化程度應為最高；(5) 累積生成初值化後的子序列與母序列在各個時刻點之差所構成的差序列，經可視化之後，僅供作重點突顯或輔助對照子序列與母序列彼此間的同步變化程度，至於實際精確的灰色關聯度與關聯排序，仍必須依靠前述灰色關聯模型一提供定量地與整體地分析和比較。



說明：(1) 相關子序列數據經累積生成處理後之灰色行為序列（左）。

(2) 相關子序列與特徵母序列數據經累積生成及初值化轉換後之灰色行為序列（中）。

(3) 累積生成初值化後的子序列與母序列在各個時刻點之差所構成的灰色差序列（右）。

圖 10 西醫師數量之灰色行為序列示意圖

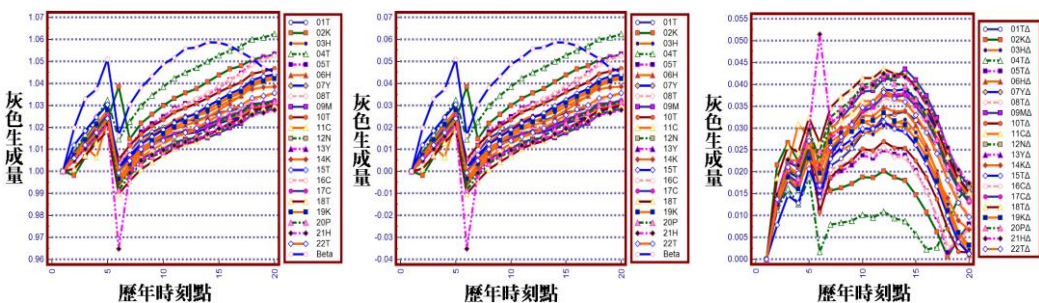
Fig. 10. Grey sequences obtained by number of physicians.

2. 灰色相對關聯度分析模型之釋例

相類似地，前揭介紹的基於起始點變化速率之灰色相對關聯分析模型（請參照數式 5、數式 6、數

式 7、數式 8)，若以臺灣都市供給變量中的機車數量為例，則其具體應用過程和意涵亦可解讀如下：

(1) 如本節前言所述，先將臺灣都市個體單元的機車數量在研究期間內的發展情形串聯後（請對照圖 18 左側組圖），設定為各個子相關序列，並將已掌握的臺灣都市機車數量的異速增長指數之歷年動態變化，設定為系統特徵母序列；(2) 施行初值化轉換，以消除序列之量綱和數量級（請對照圖 11 左側組圖），再藉由起始點零化技術處理已初值化之子序列與母序列，繼而獲取其相對於起始點的變化速率（請對照圖 11 置中組圖）；(3) 數據信息處理結果經由可視化後，便如圖 11 右側組圖所示—例如其中可見：臺北縣（對應線段 04TA）和基隆市（對應線段 02KA）的機車供給量，和集體層次的機車供給量的異速增長指數，在大部分的序列時刻點之差異為最小，亦即同步變化程度應為最高；(4) 起始點零化後的子序列與母序列在各個時刻點之差所構成的差序列，經由可視化之後，僅供作重點突顯或輔助對照子序列與母序列彼此間的同步變化程度，而實際精確的灰色關聯度與關聯排序，仍必須依靠前述灰色關聯模型—提供定量地與整體地分析和比較。



說明：(1) 相關子序列與特徵母序列數據經初值化處理後之灰色行為序列（左）。

(2) 相關子序列與特徵母序列數據經起始點零化轉換後之灰色行為序列（中）。

(3) 起始點零化後的子序列與母序列在各個時刻點之差所構成的灰色差序列（右）。

圖 11 機車數量之灰色行為序列示意圖

Fig. 11. Grey sequences obtained by number of motorcycles.

(三) 都市供給網絡的異速增長規律的灰色關聯度分析

1. 都市能源供給次系統—全年售電量、自來水總配水量

本研究運用灰色關聯分析模型對各個都市個體單元進行分析排序的第一個結果，涉及表徵臺灣都市能源供給系統的映射量—全年售電量 (annual consumption of electricity)。該分析結果表明（如圖 12 所示）：臺北市、高雄市、臺南市、屏東縣、臺北縣對集體層次的全年售電量的異速增長現象的灰關聯度最高（同步變化程度最高），繼之，灰關聯度居次的都市個體單元依序為—嘉義市、彰化縣、宜蘭縣、臺南縣、高雄縣，至於灰關聯度較微弱（同步變化程度最低）的都市個體單元則為—南投縣、臺中縣、新竹市、桃園縣、新竹縣（請參照表 2）。

本研究運用灰色關聯分析模型對各個都市個體單元進行分析排序的第二個結果，涉及表徵臺灣都市能源供給系統的映射量—自來水總配水量 (total water supply)。該分析結果表明（請參照圖 13）：臺北市、臺南市、雲林縣、嘉義市、南投縣對集體層次的自來水總配水量的異速增長現象的灰關聯度最

高(同步變化程度最高),繼之,灰關聯度居次的都市個體單元依序為—彰化縣、臺中市、臺北縣、臺東縣、宜蘭縣,至於灰關聯度較微弱(同步變化程度最低)的都市個體單元則為—新竹市、桃園縣、苗栗縣、高雄縣、新竹縣(請參照表3)。

2. 都市醫療供給次系統—西醫師數量、中醫師數量、牙醫師數量、病床數量

本研究運用灰色關聯分析模型對各個都市個體單元進行分析排序的第三個結果,涉及表徵臺灣都市醫療供給系統的映射量—西醫師數量(number of physicians)。該分析結果表明(請參照圖14):高雄市、臺北市、基隆市、宜蘭縣、臺北縣對集體層次的西醫師數量的異速增長現象的灰關聯度最高(同步變化程度最高),繼之,灰關聯度居次的都市個體單元依序為—臺中市、臺南市、花蓮縣、彰化縣、新竹市,至於灰關聯度較微弱(同步變化程度最低)的都市個體單元則為—雲林縣、南投縣、新竹縣、臺東縣、嘉義縣(請參照表4)。

本研究運用灰色關聯分析模型對各個都市個體單元進行分析排序的第四個結果,涉及表徵臺灣都市醫療供給系統的映射量—中醫師數量(number of herb doctors)。該分析結果表明(請參照圖15):臺北縣、臺中縣、花蓮縣、臺南縣、嘉義市對集體層次的中醫師數量的異速增長現象的灰關聯度最高(同步變化程度最高),繼之,灰關聯度居次的都市個體單元依序為—屏東縣、嘉義縣、高雄縣、臺中市、彰化縣,至於灰關聯度較微弱(同步變化程度最低)的都市個體單元則為—南投縣、臺北縣、新竹市、基隆市、臺東縣(請參照表5)。

本研究運用灰色關聯分析模型對各個都市個體單元進行分析排序的第五個結果,涉及表徵臺灣都市醫療供給系統的映射量—牙醫師數量(number of dentists)。該分析結果表明(請參照圖16):臺北市、基隆市、高雄市、新竹市、臺中市對集體層次的牙醫師數量的異速增長現象的灰關聯度最高(同步變化程度最高),繼之,灰關聯度居次的都市個體單元依序為—臺南市、苗栗縣、嘉義市、雲林縣、宜蘭縣,至於灰關聯度較微弱(同步變化程度最低)的都市個體單元則為—臺南縣、高雄縣、臺東縣、嘉義縣、新竹縣(請參照表6)。

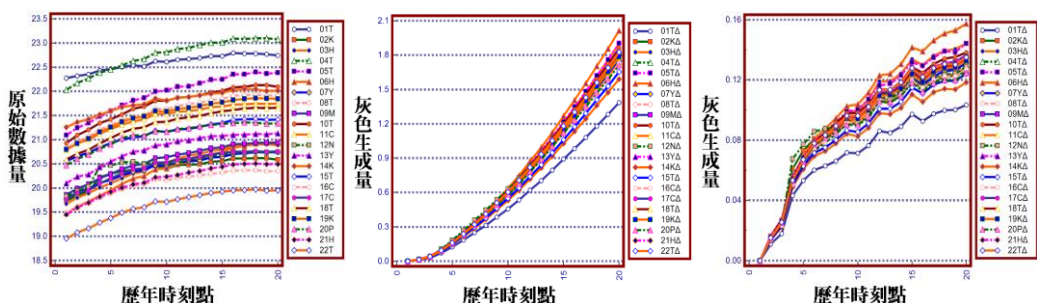
本研究運用灰色關聯分析模型對各個都市個體單元進行分析排序的第六個結果,涉及表徵臺灣都市醫療供給系統的映射量—病床數量(number of hospital beds)。該分析結果表明(請參照圖17):花蓮縣、南投縣、臺北縣、臺北市、高雄市對集體層次的病床數量的異速增長現象的灰關聯度最高(同步變化程度最高),繼之,灰關聯度居次的都市個體單元依序為—臺南縣、臺中市、嘉義縣、新竹縣、臺南市,至於灰關聯度較微弱(同步變化程度最低)的都市個體單元則為—桃園縣、屏東縣、雲林縣、臺東縣、臺中縣(請參照表7)。

3. 都市交通供給次系統—機車數量、汽車數量

本研究運用灰色關聯分析模型對各個都市個體單元進行分析排序的第七個結果,涉及表徵臺灣都市交通供給系統的映射量—機車數量(number of motorcycles)。該分析結果表明(請參照圖18):臺北縣、基隆市、桃園縣、臺中縣、臺中市對集體層次的機車數量的異速增長現象的灰關聯度最高(同步變化程度最高),繼之,灰關聯度居次的都市個體單元依序為—臺南市、臺北市、新竹市、高雄縣、高雄市,至於灰關聯度較微弱(同步變化程度最低)的都市個體單元則為—彰化縣、苗栗縣、南投縣、花蓮縣、臺南縣(請參照表8)。

本研究運用灰色關聯分析模型對各個都市個體單元進行分析排序的第八個結果,涉及表徵臺灣都

市交通供給系統的映射量—汽車數量 (number of automobiles)。該分析結果表明 (請參照圖 19)：臺北市、高雄市、臺北縣、臺南市、臺中市對集體層次的汽車數量的異速增長現象的灰關聯度最高 (同步變化程度最高)，繼之，灰關聯度居次的都市個體單元依序為—彰化縣、臺中縣、桃園縣、嘉義市、新竹市，至於灰關聯度較微弱 (同步變化程度最低) 的都市個體單元則為—基隆市、宜蘭縣、嘉義縣、花蓮縣、臺東縣 (請參照表 9)。



- 說明：(1) 尚未通過累積生成和無量綱化處理的原始子相關序列數據 (左)。
 (2) 累積生成初值化後的子序列與母序列數據在各個時刻點之差所構成的灰色差序列 (中)。
 (3) 起始點零化後的子序列與母序列數據在各個時刻點之差所構成的灰色差序列 (右)。

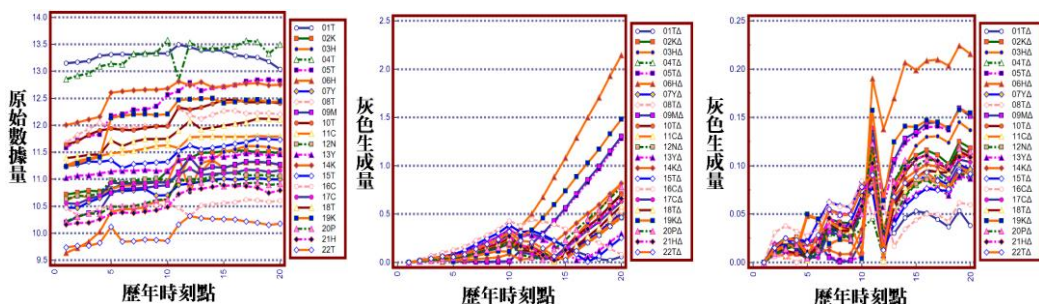
圖 12 全年售電量之原始行為序列與灰色行為序列示意圖

Fig. 12. Raw data sequences and grey sequences obtained by annual consumption of electricity.

表 2 都市個體對集體層次的異速增長現象的灰關聯排序 - 全年售電量

Table 1. Individual city rankings of annual consumption of electricity in allometric scaling relations.

	01T	02K	03H	04T	05T	06H	07Y	08T	09M	10T	11C	12N	13Y	14K	15T	16C	17C	18T	19K	20P	21H	22T
$\Gamma_{1\text{-rank}}$	1	14	18	4	21	22	8	13	12	20	7	19	15	2	3	5	11	9	10	6	17	16
$\Phi_{1\text{-rank}}$	1	9	20	7	21	22	8	14	16	19	6	10	15	2	3	5	13	12	11	4	18	17
$\Omega_{1\text{-rank}}$	1	11	20	5	21	22	8	14	13	19	7	18	15	2	3	6	12	9	10	4	17	16



- 說明：(1) 尚未通過累積生成和無量綱化處理的原始子相關序列數據 (左)。
 (2) 累積生成初值化後的子序列與母序列數據在各個時刻點之差所構成的灰色差序列 (中)。
 (3) 起始點零化後的子序列與母序列數據在各個時刻點之差所構成的灰色差序列 (右)。

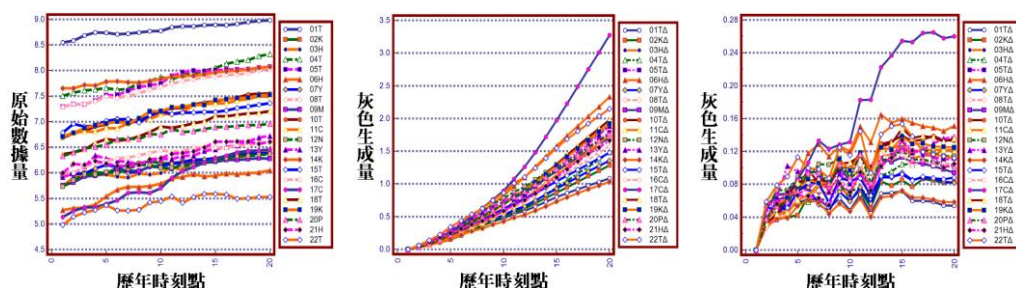
圖 13 自來水總配水量之原始行為序列與灰色行為序列示意圖

Fig.13. Raw data sequences and grey sequences obtained by total water supply.

表 3 都市個體對集體層次的異速增長現象的灰關聯排序 - 自來水總配水量

Table 3. Individual city rankings of total water supply in allometric scaling relations.

	01T	02K	03H	04T	05T	06H	07Y	08T	09M	10T	11C	12N	13Y	14K	15T	16C	17C	18T	19K	20P	21H	22T
$\Gamma_{2\text{rank}}$	3	17	16	4	19	22	6	1	20	12	5	2	7	13	11	18	8	10	21	14	15	9
$\Phi_{2\text{rank}}$	1	15	17	9	19	22	8	10	20	14	7	5	4	18	3	2	12	11	21	16	13	6
$\Omega_{2\text{rank}}$	1	15	18	8	19	22	10	7	20	13	6	5	3	17	2	4	12	11	21	16	14	9



說明：(1) 尚未通過累積生成和無量綱化處理的原始子相關序列數據 (左)。

(2) 累積生成初值化後的子序列與母序列數據在各個時刻點之差所構成的灰色差序列 (中)。

(3) 起始點零化後的子序列與母序列數據在各個時刻點之差所構成的灰色差序列 (右)。

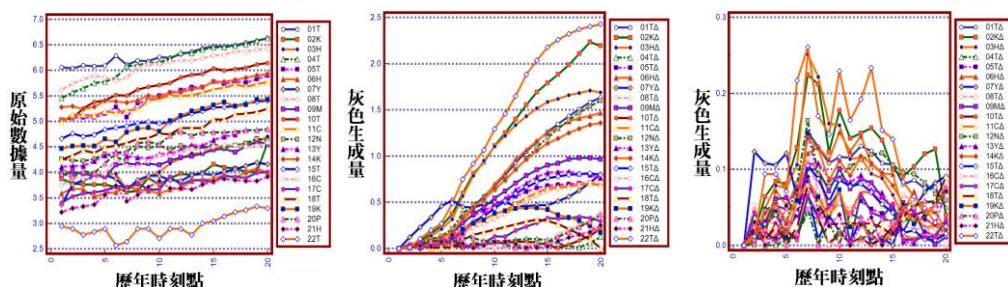
圖 14 西醫師數量之原始行為序列與灰色行為序列示意圖

Fig. 14. Raw data sequences and grey sequences obtained by number of physicians.

表 4 都市個體對集體層次的異速增長現象的灰關聯排序 - 西醫師數量

Table 4. Individual city rankings of number of physicians in allometric scaling relations.

	01T	02K	03H	04T	05T	06H	07Y	08T	09M	10T	11C	12N	13Y	14K	15T	16C	17C	18T	19K	20P	21H	22T
$\Gamma_{3\text{rank}}$	2	3	11	4	10	20	5	6	13	17	8	19	18	1	7	12	22	16	15	14	9	21
$\Phi_{3\text{rank}}$	2	3	10	5	14	21	4	7	9	18	11	16	15	1	6	12	22	19	17	13	8	20
$\Omega_{3\text{rank}}$	2	3	10	5	11	20	4	6	12	17	9	19	18	1	7	13	22	16	15	14	8	21



說明：(1) 尚未通過累積生成和無量綱化處理的原始子相關序列數據 (左)。

(2) 累積生成初值化後的子序列與母序列數據在各個時刻點之差所構成的灰色差序列 (中)。

(3) 起始點零化後的子序列與母序列數據在各個時刻點之差所構成的灰色差序列 (右)。

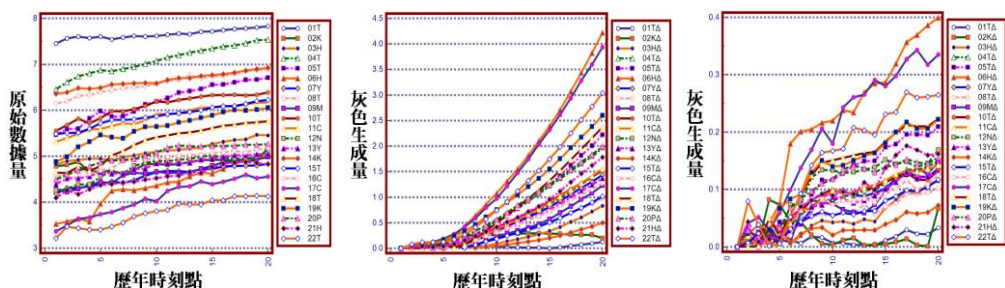
圖 15 中醫師數量之原始行為序列與灰色行為序列示意圖

Fig. 15. Raw data sequences and grey sequences obtained by number of herb doctors.

表 5 都市個體對集體層次的異速增長現象的灰關聯排序 - 中醫師數量

Table 5. Individual city rankings of number of herb doctors in allometric scaling relations.

	01T	02K	03H	04T	05T	06H	07Y	08T	09M	10T	11C	12N	13Y	14K	15T	16C	17C	18T	19K	20P	21H	22T
$\Gamma 4_{\text{rank}}$	19	21	20	2	11	17	14	9	15	1	10	18	13	16	12	4	7	6	8	5	3	22
$\Phi 4_{\text{rank}}$	19	21	20	2	11	17	9	12	15	3	10	18	13	16	14	7	8	1	5	6	4	22
$\Omega 4_{\text{rank}}$	19	21	20	1	11	17	12	9	15	2	10	18	13	16	14	5	7	4	8	6	3	22



說明：(1) 尚未通過累積生成和無量綱化處理的原始子相關序列數據 (左)。

(2) 累積生成初值化後的子序列與母序列數據在各個時刻點之差所構成的灰色差序列 (中)。

(3) 起始點零化後的子序列與母序列數據在各個時刻點之差所構成的灰色差序列 (右)。

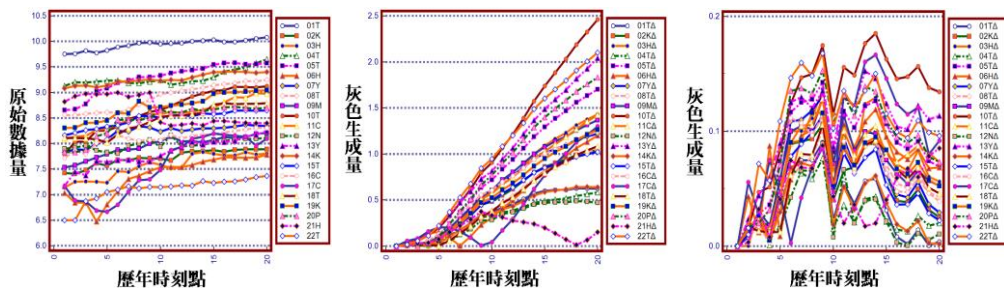
圖 16 牙醫師數量之原始行為序列與灰色行為序列示意圖

Fig. 16. Raw data sequences and grey sequences obtained by number of dentists.

表 6 都市個體對集體層次的異速增長現象的灰關聯排序 - 牙醫師數量

Table 6. Individual city rankings of number of dentists in allometric scaling relations.

	01T	02K	03H	04T	05T	06H	07Y	08T	09M	10T	11C	12N	13Y	14K	15T	16C	17C	18T	19K	20P	21H	22T
$\Gamma 5_{\text{rank}}$	1	4	3	12	17	22	10	6	7	13	11	15	9	2	5	8	21	16	19	18	14	20
$\Phi 5_{\text{rank}}$	1	2	4	12	17	22	10	5	7	11	13	15	9	3	6	8	21	18	19	16	14	20
$\Omega 5_{\text{rank}}$	1	2	4	12	17	22	10	5	7	13	11	15	9	3	6	8	21	18	19	16	14	20



說明：(1) 尚未通過累積生成和無量綱化處理的原始子相關序列數據 (左)。

(2) 累積生成初值化後的子序列與母序列數據在各個時刻點之差所構成的灰色差序列 (中)。

(3) 起始點零化後的子序列與母序列數據在各個時刻點之差所構成的灰色差序列 (右)。

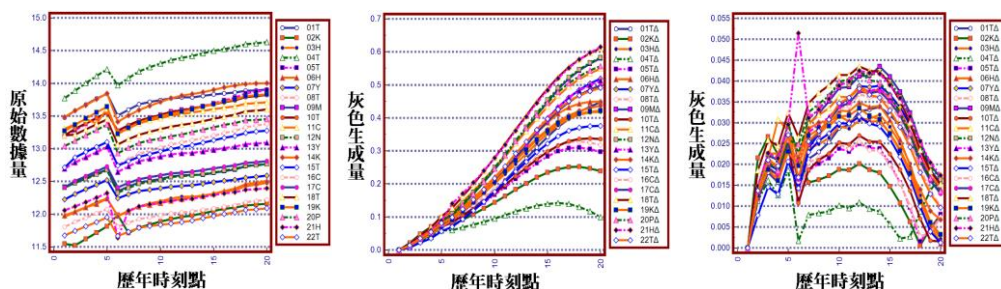
圖 17 病床數量之原始行為序列與灰色行為序列示意圖

Fig. 17. Raw data sequences and grey sequences obtained by number of hospital beds.

表 7 都市個體對集體層次的異速增長現象的灰關聯排序 - 病床數量

Table 7. Individual city rankings of number of hospital beds in allometric scaling relations.

	01T	02K	03H	04T	05T	06H	07Y	08T	09M	10T	11C	12N	13Y	14K	15T	16C	17C	18T	19K	20P	21H	22T
Γ_6 rank	5	11	16	3	18	9	13	8	17	22	14	2	20	4	10	15	6	7	12	19	1	21
Φ_6 rank	4	7	17	3	18	10	11	8	15	22	16	2	20	5	6	12	14	9	13	19	1	21
Ω_6 rank	4	11	17	3	18	9	13	7	16	22	15	2	20	5	10	14	8	6	12	19	1	21



說明：(1) 尚未通過累積生成和無量綱化處理的原始子相關序列數據 (左)。

(2) 累積生成初值化後的子序列與母序列數據在各個時刻點之差所構成的灰色差序列 (中)。

(3) 起始點零化後的子序列與母序列數據在各個時刻點之差所構成的灰色差序列 (右)。

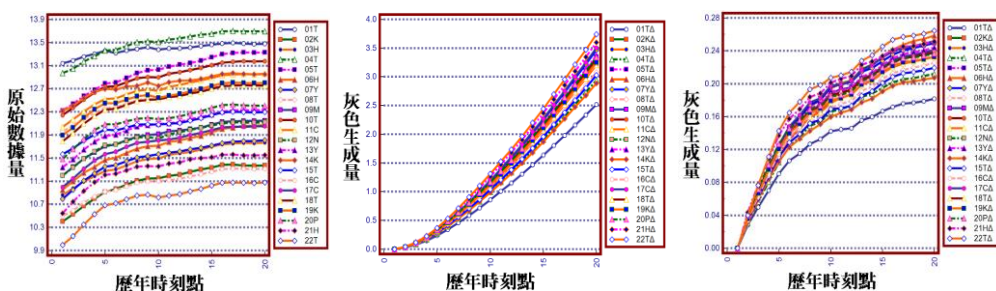
圖 18 機車數量之原始行為序列與灰色行為序列示意圖

Fig. 18. Raw data sequences and grey sequences obtained by number of motorcycles.

表 8 都市個體對集體層次的異速增長現象的灰關聯排序 - 機車數量

Table 8. Individual city rankings of number of motorcycles in allometric scaling relations.

	01T	02K	03H	04T	05T	06H	07Y	08T	09M	10T	11C	12N	13Y	14K	15T	16C	17C	18T	19K	20P	21H	22T
Γ_7 rank	7	2	9	1	3	15	13	6	18	4	19	20	14	10	5	12	11	22	8	17	21	16
Φ_7 rank	10	2	7	1	3	11	16	4	19	5	17	20	15	9	6	12	14	21	8	18	22	13
Ω_7 rank	7	2	8	1	3	11	16	5	19	4	18	20	15	10	6	13	12	22	9	17	21	14



說明：(1) 尚未通過累積生成和無量綱化處理的原始子相關序列數據 (左)。

(2) 累積生成初值化後的子序列與母序列數據在各個時刻點之差所構成的灰色差序列 (中)。

(3) 起始點零化後的子序列與母序列數據在各個時刻點之差所構成的灰色差序列 (右)。

圖 19 汽車數量之原始行為序列與灰色行為序列示意圖

Fig. 19. Raw data sequences and grey sequences obtained by number of automobiles.

表 9 都市個體對集體層次的異速增長現象的灰關聯排序 - 汽車數量

Table 9. Individual city rankings of number of automobiles in allometric scaling relations.

	01T	02K	03H	04T	05T	06H	07Y	08T	09M	10T	11C	12N	13Y	14K	15T	16C	17C	18T	19K	20P	21H	22T
$\Gamma 8_{\text{rank}}$	1	18	9	3	6	17	19	5	14	8	7	12	15	2	4	10	20	13	11	16	21	22
$\Phi 8_{\text{rank}}$	1	18	11	3	9	19	17	5	15	7	6	12	16	2	4	8	20	13	10	14	21	22
$\Omega 8_{\text{rank}}$	1	18	10	3	8	17	19	5	14	7	6	12	15	2	4	9	20	13	11	16	21	22

綜合討論

(一) 臺灣都市供給網絡的異速增長規律

根據已掌握的和受檢測的臺灣都市供給次系統或都市供給變量（請參照本文第二部分）綜合而論：(1) 都市供給變量裡的一售電量 ($\beta \in [1.08, 1.18]$)、配水量 ($\beta \in [1.08, 1.24]$)、西醫師數量 ($\beta \in [1.02, 1.06]$)、中醫師數量 ($\beta \in [1.00, 1.19]$)、牙醫師數量 ($\beta \in [1.18, 1.25]$)，皆是隨都市規模越大，其人均度量就越高 (agglomeration diseconomies)(Samet 2013)；(2) 都市供給變量裡的一病床數量 ($\beta \in [0.77, 0.86]$)、機車數量 ($\beta \in [0.90, 0.95]$)，卻是隨都市規模的增長，反倒節約其人均度量 (agglomeration economies)(Samet 2013)。

按照本文第二部分之都市供給網絡的異速增長規律之分析結果，與過去相關研究議題進行呼應，可進一步補充兩點在過去文獻所未能提供的洞察：(1) 在滿足良好擬合配適度的前提下，當臺灣的都市規模一旦擴大或增長，則其所伴隨的供給次系統或供給變量（譬如本研究內容所涵蓋之售電量、配水量、西醫師數量、中醫師數量、牙醫師數量、病床數量、機車數量等），幾乎皆是非線性的異速增長 (super-linear scaling; sub-linear scaling)，而非傳統規劃和實務所預期的或認知的線性增長 (Barenblatt 2003; Bettencourt et al. 2010)，並與其他國家或都市體系的經驗研究所揭示之非線性的幕次增長特性相符 (Bettencourt et al. 2007)。若再從都市供給次系統的異速增長指數在不同年度時刻點的縱斷面變化來審視（如圖 3、圖 5、圖 7、圖 9），可更清楚地確認都市發展歷程中展現的等速增長狀態 (linear scaling)，應僅是所有異速增長狀態裡極為少數的特例（可對照 Kühnert, Helbing, and West 2006）；(2) 都市供給次系統的異速增長指數除了會隨時間推進而變化之外，其動態變化的數值區間，也不一定嚴格受限於異速或等速增長關係中任一特定類型（請參照圖 9）。舉例來說，臺灣都市供給變量中的汽車數量，便是隨都市住居人口的增長—可能更為節約 ($\beta \in [0.97, 0.98]$)，也可能更加助長 ($\beta \in [1.02, 1.15]$)，但也可能等於或逼近單純的和預設的線性增長 ($\beta=1$)。由此可見，過去文獻（如 Bettencourt et al. 2007）對於都市異速增長指數的既有分類方式 (classification of scaling exponents for urban properties)，或許仍過於單純簡化，而尚待更進一步的研究與討論。

此外，臺灣都市供給網絡的異速增長規律之分析內容，尚有兩關鍵概念必須特別釐清和討論：第一點，前揭分析內容提及的傳統認知與非傳統認知，或者線性發展和非線性發展等論述，旨在於突顯：(1) 以經典牛頓力學與還原論方法為核心的傳統思維，是著重在線性、對稱、解構、可還原、靜態均衡的機械化世界觀 (Portugali 2011)；(2) 反觀在二十世紀末興起的複雜科學 (complexity sciences) 及以

其為核心思維的都市發展理論 (Portugali et al. 2012; Lai and Han 2014)，則力圖跳脫經典牛頓力學與還原論方法所帶動的傳統思維，乃是基於非線性發展、有組織的複雜性、動態遠離均衡等更貼近於真實世界狀況與反應的生物有機觀。第二點，前揭討論內容所提及之較經濟與較不經濟兩種經濟特性之比較或對照，旨在於強調：(1) 都市發展規模越大其對應的供給來源的數量或規模必然越大，但是在次線性增長的情況下 (sub-linear scaling)，每個人所對應的或所需的份額卻將更少，故較為經濟 (agglomeration economies)。譬如本研究發現，臺灣都市供給變量中的病床數量和機車數量，便是隨都市規模發展越大，其人均度量就越少 (請對照本文第二部分)。若參照過去各國相關文獻可見 (Kühnert, Helbing, and West 2006; Helbing et al. 2009)，汽車經銷商數量、購物中心數量和綜合醫院數量，同樣也是隨都市規模發展越大，其人均度量就越少—反言之，隨著都市規模越大，每單位汽車經銷商、購物中心和綜合醫院所供應的或所服務的都市住居者的份額 (per-capita basis) 將會越多；(2) 都市發展規模越大其對應的供給來源的數量或規模必然越大，特別是在超線性增長的情況下 (super-linear scaling)，每個人所對應的或所需的份額也將更多，故較為不經濟 (agglomeration diseconomies)。譬如本研究發現，臺灣都市供給變量中的售電量、配水量、西醫師數量、中醫師數量、牙醫師數量，便是隨都市規模發展越大，其人均度量就越多 (請對照本文第二部分)。若參照過去各國相關文獻可見 (Kühnert, Helbing and West 2006; Helbing et al. 2009)，餐館數量和西醫師數量，同樣也是隨都市規模發展越大，其人均度量就越多—反言之，隨著都市規模越大，每單位餐廳或西醫師所供應的或所服務的都市住居者的份額 (per-capita basis) 反而將會越少。

(二) 臺灣都市供給網絡的異速增長規律的灰色關聯度分析

根據基於累加生成的灰色關聯分析模型、灰色相對關聯分析模型與灰色綜合關聯分析模型之分析內容總和來看 (請參照本文第三部分)：(1) 臺北市、臺北縣、臺南市、高雄市、臺中市、嘉義市、彰化縣、基隆市共計八個都市個體的供給變量在研究期間內的發展情形，對於臺灣都市供給次系統的異速增長規律，大多具有明顯關聯 (即同步變化程度相對高)，但其中又依序以臺北市、臺北縣、臺南市、高雄市、臺中市等五個都市個體的關聯程度最為突出；(2) 桃園縣、雲林縣、屏東縣、南投縣、嘉義縣、苗栗縣、新竹縣、臺東縣共計八個都市個體的供給變量在研究期間內的發展情形，對於臺灣都市供給次系統的異速增長規律，大多關聯不明顯 (即同步變化程度相對低)，但其中又依序以南投縣、嘉義縣、苗栗縣、新竹縣、臺東縣等五個都市個體的關聯程度最為疲弱。

若進一步梳理前揭分析結果，則可再歸納出三點過去文獻對於都市供給網絡的異速增長規律的基本機理 (microscopic level) 所未曾提供的洞察：(1) 系統相關的都市個體所共同實現的各種都市供給次系統的異速增長規律 (如圖 2、圖 4、圖 6、圖 8)，雖已被證實和普遍接受是相近類似的 (scale in a similar way)(Kühnert, Helbing, and West 2006; Lobo et al. 2013; Bettencourt 2013)，然令人意外地，系統內的相關都市個體對於這些相近類似的都市供給次系統的異速增長規律，其主次順序或關聯程度 (同步變化程度)，卻幾乎完全不同 (請參照表 10)，尤其是在表徵都市能源供給次系統、都市醫療供給次系統與都市交通供給次系統三種不同範疇的供給變量之間的差異更為顯著；(2) 都市個體的人口規模大小，與都市個體對於都市供給網絡的異速增長規律的關聯程度，兩者間並沒有絕對關係，譬如「臺北市」和「高雄市」之年底家戶數與年底人口數為相對多，但是分別對臺灣都市供給變量裡的「中醫師數量」

和「配水量」的異速增長規律的關聯程度卻是非常疲弱；反過來說，譬如「花蓮縣」和「宜蘭縣」之年底家戶數與年底人口數為相對少，但是分別對臺灣都市供給變量裡的「病床數量」和「西醫師數量」的異速增長規律的關聯程度卻是非常顯著（請參照表 10）；(3) 都市個體的政治經濟份量，與都市個體對於都市供給網絡的異速增長規律的關聯程度，兩者間卻可能關係非常緊密。根據本文第三部分分析結果顯示，過去完整二十個連續年度時刻點的期間內（即自 1991 年至 2010 年），廣泛類別的臺灣都市供給次系統的異速增長規律，絕大部分與臺北市、臺北縣、臺南市、高雄市、臺中市等五個都市個體的都市供給變量的發展情形，有相當明顯的同步變化程度（請參照表 10）。其中，臺北市即現今中央政府的駐在地，高雄市則毗鄰臺灣最重要的海運樞紐，而臺北縣則為臺灣地區人口規模最大之都市個體並全境緊密圍繞首善之都臺北市，至於臺中市則與臺南市相類似一皆肩負區域的政治、經濟以及產業的集聚中心。

表 10 都市個體對都市供給系統的異速增長現象的灰色綜合關聯排序

Table 10. Individual city rankings of urban supply networks in allometric scaling relations.

Rank	01T	02K	03H	04T	05T	06H	07Y	08T	09M	10T	11C	12N	13Y	14K	15T	16C	17C	18T	19K	20P	21H	22T
Ω1	1	11	20	5	21	22	8	14	13	19	7	18	15	2	3	6	12	9	10	4	17	16
Ω2	1	15	18	8	19	22	10	7	20	13	6	5	3	17	2	4	12	11	21	16	14	9
Ω3	2	3	10	5	11	20	4	6	12	17	9	19	18	1	7	13	22	16	15	14	8	21
Ω4	19	21	20	1	11	17	12	9	15	2	10	18	13	16	14	5	7	4	8	6	3	22
Ω5	1	2	4	12	17	22	10	5	7	13	11	15	9	3	6	8	21	18	19	16	14	20
Ω6	4	11	17	3	18	9	13	7	16	22	15	2	20	5	10	14	8	6	12	19	1	21
Ω7	7	2	8	1	3	11	16	5	19	4	18	20	15	10	6	13	12	22	9	17	21	14
Ω8	1	18	10	3	8	17	19	5	14	7	6	12	15	2	4	9	20	13	11	16	21	22

(三) 臺灣都市供給網絡的異速增長規律的規劃啟示與指導意涵

最後，本文必須再加強對話與討論的是：過去一系列對於各個區域或國家之都市供給次系統的異速增長研究（Kühnert, Helbing, and West 2006; Bettencourt et al. 2007; Bettencourt, Lobo, and West 2008; Helbing et al. 2009），幾乎皆專注在探究其供給變量究竟是如何隨都市規模而縮放（scaling），正如同「瓦特林路德國際地理學獎（Vautrin Lud International Geography Prize; Lauréat Prix International de Géographie Vautrin Lud）」得主 Michael Batty 於國際頂尖期刊《Science》中所強調（Batty 2013b）—該系列相關文獻及其分析模式（Bettencourt's analysis），旨在揭示各種都市屬性是如何隨著都市人口規模而變化並有助於都市規劃。

但該系列相關文獻在竭力揭示各種都市屬性究竟是如何隨著都市人口規模而變化之後（典型如圖 1 所示），就未再提出任何規劃啟示或指導意涵。換句話說，過去系列文獻雖然一再強調自然生物永續性，並將都市隱喻為生物有機體（Bettencourt et al. 2007; Bettencourt 2013），然而，對於不合於永續性的都市增長方式，卻缺乏更進一步的指導意涵。舉例來說，荷蘭、德國和意大利地區的都市供給變量裡的西醫師數量，藉過去經驗研究可知（Kühnert, Helbing, and West 2006; Helbing et al. 2009），皆長期

處在較不永續或較不經濟的超線性增長狀態；相類似地，如同本文第二部分圖文所示：已掌握的和受檢測的臺灣都市供給變量中，獨有病床數量和機車數量可穩定維持在較永續的和較經濟的次線性增長狀態，但是，其餘的售電量、配水量、西醫師數量、中醫師數量、牙醫師數量等眾多都市供給變量，在研究期間內卻始終處於較不永續的或較不經濟的超線性增長狀態。

是以，本研究意圖基於前揭之異速增長分析和灰色關聯分析之結果（請參照本文第二部分和第三部分），探求其關鍵干預點（critical intervention points）(Samet 2012)——亦即透過動態發展過程中，與異速增長斜率（ β , allometric slope）同步變化程度較高的關鍵都市個體——由下而上地（from the bottom up）引領都市自我組織網絡的供給次系統之異速增長斜率，趨向更為經濟的與更為永續的增長方式（即 sub-linear scaling）。譬如，若以臺灣都市供給變量中的「售電量」為例，其合理的與較佳的關鍵干預點可能便是：臺北市、高雄市、臺南市、屏東縣、臺北縣（請參照表 2）；若以臺灣都市供給變量中的「配水量」為例，其合理的與較佳的關鍵干預點可能便是：臺北市、臺南市、雲林縣、嘉義市、南投縣（請參照表 3）；若以臺灣都市供給變量中的「西醫師數量」為例，其合理的與較佳的關鍵干預點可能便是：高雄市、臺北市、基隆市、宜蘭縣、臺北縣（請參照表 4）；若以臺灣都市供給變量中的「中醫師數量」為例，其合理的與較佳的關鍵干預點可能便是：臺北縣、臺中縣、花蓮縣、臺南縣、嘉義市（請參照表 5）；若以臺灣都市供給變量中的「牙醫師數量」為例，其合理的與較佳的關鍵干預點可能便是：臺北市、基隆市、高雄市、新竹市、臺中市（請參照表 6）；若以臺灣都市供給變量中的「病床數量」為例，其合理的與較佳的關鍵干預點可能便是：花蓮縣、南投縣、臺北縣、臺北市、高雄市（請參照表 7）；若以臺灣都市供給變量中的「機車數量」為例，其合理的與較佳的關鍵干預點可能便是：臺北縣、基隆市、桃園縣、臺中縣、臺中市（請參照表 8）；若以臺灣都市供給變量中的「汽車數量」為例，其合理的與較佳的關鍵干預點可能便是：臺北市、高雄市、臺北縣、臺南市、臺中市（請參照表 9）。若由本研究所掌握的和所檢測的都市供給變量綜合來看，則臺北市、臺北縣、臺南市、高雄市、臺中市等五個都市個體，極可能就是最合理的與最佳的關鍵干預點（請參照表 10）。

結 論

儘管過去關於都市供給網絡的異速增長規律的一系列研究，已經提出並重複地確認一個普遍成立的數學通用模式，來客觀地檢測與定量地預期都市發展或都市增長究竟「會如何」或「將如何」改變都市之實質環境，但在時間構面上，卻仍舊忽略了異速增長規律應用於都市進化過程時所可能蘊藏的變化和軌跡，從而缺乏對於都市供給次系統的異速增長指數在連續年度時刻點之動態探查。故，本研究利用臺灣地區自 1991 年至 2010 年共計二十個連續年度時刻點之既有統計數據集施行數據擬合與檢測，嘗試與過去相關議題進行呼應，兼之彌補這個在過去文獻所未曾處理的研究議題——就本研究所掌握的和檢測的數據結果可見：(1) 當都市規模一旦擴大或增長，則其所伴隨的供給次系統或供給變量，幾乎皆是非線性的異速增長，而非傳統規劃和實務所預期的或認知的線性增長（linear growth），並與過去其他國家或都市體系的經驗研究所揭示之幕次增長特性相符；(2) 都市供給變量或都市供給次系統之異速增長指數，皆普遍隨時間推進而持續震盪波動，並非如同生物節奏般地永恆不變（相對於 Kleiber's law 或 Rubner's law），當然亦不存在固定的或穩定的異速增長指數；(3) 從都市供給次系統或

都市供給變量的異速增長指數在不同年度時刻點的縱斷面變化來審視，可更清楚地確認其等速增長狀態 (isometry)，僅僅是所有異速增長狀態中極為少數的特例；(4) 從都市供給次系統或都市供給變量的數據擬合配適度在不同年度時刻點的縱斷面變化來審視，則可發現其逐年微幅上升的趨勢，而該上升趨勢即表示都市體系之異速增長特性或自我組織行為越趨於顯著；(5) 都市供給次系統或都市供給變量的異速增長指數除了隨時間推進而變化之外，其動態變化的數值區間，也不一定嚴格受限於異速或等速增長關係中任一特定類型 ($\beta > 1$; $\beta = 1$; $\beta < 1$)。

另一方面，過去研究不僅直接略過都市供給次系統的異速增長規律的動態探查之外，亦未曾考量眾多系統相關的都市個體，與都市個體所共同突現的異速增長指數之間的同步變化程度，以致目前仍無法進一步認識眾多系統相關的都市個體，在有機的和有組織的異速增長過程裡所潛藏的主次順序和基本機理。故，本研究同樣藉由臺灣地區自 1991 年至 2010 年共計二十個連續年度時刻點之既有統計數據集，併同擬合檢測時所獲取的都市供給次系統的異速增長指數之歷年動態變化，透過灰色關聯模型執行序列比較分析，嘗試彌補這個在過去文獻所未曾觸及的研究議題—就本研究所掌握的和所分析的數據結果綜合而論：(1) 臺北市、臺北縣、臺南市、高雄市、臺中市等五個都市個體的供給變量在研究期間內的發展情形，對於臺灣都市供給次系統的異速增長規律，大多具有明顯關聯 (2) 南投縣、嘉義縣、苗栗縣、新竹縣、臺東縣等五個都市個體的供給變量在研究期間內的發展情形，對於臺灣都市供給次系統的異速增長規律，則大多關聯非常微弱。若進一步爬梳上述比較分析結果的主次排序和關聯程度，則可再歸納出三點過去文獻對於都市供給網絡的異速增長規律的基本機理所未曾提供的洞察：(1) 系統相關的都市個體所共同突現的各種都市供給次系統的異速增長規律，雖已被證實和普遍接受是相近類似的 (scale in a similar way)，然令人意外地，系統內的相關都市個體對於這些相近類似的都市供給次系統的異速增長規律，其主次順序或關聯程度卻幾乎完全不同；(2) 都市個體的人口規模大小，與都市個體對於都市供給網絡的異速增長規律的關聯程度，兩者間並沒有絕對關係；(3) 都市個體的政治經濟份量，與都市個體對於都市供給網絡的異速增長規律的關聯程度，兩者間卻極可能關係非常緊密。

再者，過去一系列相關研究及其理論架構，雖然再三強調自然生物永續性，並提倡將都市個體單元和都市體系分別隱喻為生物有機體和生物有機網絡，然而，對於不合於生物永續性的都市增長方式，卻缺乏更進一步的討論。是以，本研究基於第二部分之異速增長分析和第三部分灰色關聯分析之分析結果，探求在動態發展過程中，與異速增長規律同步變化程度較高的關鍵都市個體—預期透過關鍵都市個體的供給次系統的合理發展，有效地提升整個都市體系的永續性 (sustainability)，進而彌補過去文獻所未能提供的規劃啟示和指導意涵。

整體而論，本篇研究的目的並不在於對所有的都市供給變量或其異速增長規律提供諸多條件侷限下的模型建構或是強化對應後的理論詮釋 (Bettencourt et al. 2007; Bettencourt, Lobo, and West 2008; Bettencourt 2013)，亦非僅就臺灣都市異速增長現象進行分析結果彙整，而是試圖：(1) 基於較完整的及較長期的統計數據集，驗證過去一系列的最新研究發現和實證結果之有效性 (scaling and biological metaphors for the city)，繼而檢視及探討異速增長規律應用於都市演化過程時所體現的動態變化，進一步完善及修正無法透過簡單的都市個體或都市區域的聚集來解析的異速增長規律；(2) 結合灰色關聯分析方法以及由既有統計數據集和擬合數據集所構築的灰色序列 (grey sequences)，深入探究都市個體

單元在都市供給網絡的異速增長規律中的潛在機理及關鍵個體，繼而實現過去其他各國相關研究所普遍缺乏的都市個體層次的規劃意涵——通過關鍵都市個體的合理發展後的網絡交互作用 (Otto, Rall, and Brose 2007; West and Grigolini 2011; Samet 2012)，自下而上地引領都市自我組織網絡的供給次系統之總體平均特性 (macroscopic properties)，趨向更為有機的、更為經濟的與更為永續的增長方式。基於前述，本研究議程除可作為各種都市發展目標或都市發展策略 (Frey 1999; Bell and Morse 2003) 的決策基礎與補充，並對於促進都市個體甚至是整個都市體系的永續性 (Clark and Dickson 2003; Gell-Mann 2010; West 2010)，具有極為正面積極的指導意義。

謝 辭

本論文之部分研究成果曾發表於：(1) The 9th International Symposium and Scientific Committee of Asia Institute of Urban Environment (AIUE)、(2) 2012 年 12 月之中華民國都市計劃學會、區域科學學會、住宅學會、地區發展學會聯合年會暨論文研討會、(3) 2013 年 12 月之中華民國都市計劃學會、區域科學學會、住宅學會、地區發展學會聯合年會暨論文研討會，感謝會議主持人－林峰田教授、林楨家教授、陳建元教授和現場與談專家之評論意見。作者感謝賴孚權教授、洪鴻智教授、林子欽教授、葉大綱教授於本論文寫作過程中的觀點交流與討論。作者感謝科技部對本研究的經費支持 (計畫編號：NSC101-2410-H305-066-MY2)。

引用文獻

- 曾波、張德海、孟偉 [Zeng, B., D. H. Zhang, and W. Meng] 2013。基於累加生成的灰色關聯分析模型拓展研究 [Ji yu lei jia sheng cheng de hui se guan lian fen xi mo xing tuo zhan yan jiu; Expanding research of grey incidence analysis model based on accumulating generator] 世界科技研究與展望 [Shi jie ke ji yan jiu yu zhan wang; WORLD SCI-TEC R&D] 35 (1): 146-9.
- 鄧聚龍 [Deng, J. L.] 2002。灰理論基礎 [Hui li lun ji chu]。武漢 [Wuhan]：華中科技大學出版社 [Huazhong University of Science and Technology Press]。
- 劉思峰、楊英傑、吳利豐 [Liu, S. F., Y. J. Yang, and L. F. Wu] 2014。灰色系統理論及其應用 (第七版)[Hui se xi tong li lun ji qi ying yong]。北京 [Beijing]：科學出版社 [Science Press]。
- 劉思峰、蔡華、楊英傑、曹穎 [Liu, S. F., H. Cai, Y. J. Yang, and Y. Cao] 2013。灰色關聯分析模型研究進展 [Hui se guan lian fen xi mo xing yan jiu jin zhan; Advance in grey incidence analysis modeling]。系統工程理論與實踐 [Xi tong gong cheng li lun yu shi jian; Systems Engineering: Theory and Practice] 33 (8): 2041-6。
- 劉思峰、謝乃明 [Liu, S. F., and N. M. Xie] 2013。灰色系統理論及其應用 (第六版)[Hui se xi tong li lun ji qi ying yong]。北京 [Beijing]：科學出版社 [Science Press]。
- 劉思峰、黨耀國、方志耕、謝乃明 [Liu, S. F., Y. G. Dang, Z. G. Fang, and N. M. Xie] 2010。灰色系統理論及其應用 (第五版)[Hui se xi tong li lun ji qi ying yong]。北京 [Beijing]：科學出版社 [Science Press]。

Press] °

- Anderson, P. W. 2001. More is different: One more time. In *More is different: Fifty years of condensed matter physics*, eds. N. P. Ong, and R. N. Bhatt, 1-8. Princeton and Oxford: Princeton University Press.
- Arcaute, E., E. Hatna, P. Ferguson, H. Youn, A. Johansson, and M. Batty. 2015. Constructing cities, deconstructing scaling laws. *Journal of the Royal Society Interface* 12 (102): 20140745.
- Barenblatt, G. I. 2003. *Scaling*. Cambridge: Cambridge University Press, doi: 10.1017/CBO9780511814921.
- Batty, M. 2000. Less is more, more is different: Complexity, morphology, cities, and emergence. *Environment and Planning B: Planning and Design* 27 (2): 167-8, doi: 10.1068/b2702ed.
- . 2008. The size, scale, and shape of cities. *Science* 319 (5864): 769-71, doi: 10.1126/science.1151419.
- . 2012. Building a science of cities. *Cities* 29: S9-16, doi: 10.1016/j.cities.2011.11.008.
- . 2013a. *The new science of cities*. Cambridge, MA: MIT Press.
- . 2013b. A theory of city size. *Science* 340 (6139): 1418-9, doi: 10.1126/science.1239870.
- Batty, M., and P. M. Torrens. 2005. Modelling and prediction in a complex world. *Futures* 37 (7): 745-66, doi: 10.1016/j.futures.2004.11.003.
- Bell, S., and S. Morse. 2003. *Measuring sustainability: Learning from doing*. London: Earthscan Publications Ltd.
- Bergstrom, C. T., and L. A. Dugatkin. 2012. *Evolution*. New York: W.W. Norton and Company.
- Bettencourt, L. M. 2013. The origins of scaling in cities. *Science* 340 (6139): 1438-41, doi: 10.1126/science.1235823.
- Bettencourt, L., and G. West. 2010. A unified theory of urban living. *Nature* 467 (7318): 912-3, doi: 10.1038/467912a.
- Bettencourt, L. M. A., J. Lobo, and D. Strumsky. 2007. Invention in the city: Increasing returns to patenting as a scaling function of metropolitan size. *Research Policy* 36 (1): 107-20, doi: 10.1016/j.respol.2006.09.026.
- Bettencourt, L. M. A., J. Lobo, and G. B. West. 2008. Why are large cities faster? Universal scaling and self-similarity in urban organization and dynamics. *The European Physical Journal B* 63 (3): 285-93, doi: 10.1140/epjb/e2008-00250-6.
- . 2009. The self similarity of human social organization and dynamics in cities. In *Complexity perspectives in innovation and social change*, eds. D. Lane, D. Pumain, S. van der Leeuw, and G. B. West, 221-36. Netherlands: Springer, doi: 10.1007/978-1-4020-9663-1_8.
- Bettencourt, L. M. A., J. Lobo, D. Helbing, C. Kühnert, and G. B. West. 2007. Growth, innovation, scaling, and the pace of life in cities. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104 (17): 7301-6, doi: 10.1073/pnas.0610172104.
- Bettencourt, L. M. A., J. Lobo, D. Strumsky, and G. B. West. 2010. Urban scaling and its deviations: Revealing the structure of wealth, innovation and crime across cities. *PLOS ONE* 5 (11): e13541, doi: 10.1371/journal.pone.0013541.

- Bonner, J. T. 2006. *Why size matters: From bacteria to blue whales*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press.
- Brown, J. H., and G. B. West. eds. 2000. *Scaling in biology*. New York: Oxford University Press.
- Buonanno, R. 2014. *The stars of Galileo Galilei and the universal knowledge of Athanasius Kircher*. Translation by R. Buonanno and G. Giobbi. Switzerland: Springer International Publishing.
- Chave, J., and S. Levin. 2003. Scale and scaling in ecological and economic systems. *Environmental and Resource Economics* 26 (4): 527-57, doi: 10.1023/B:EARE.0000007348.42742.49.
- Christiansen, P. 1999. Long bone scaling and limb posture in non-avian theropods: Evidence for differential allometry. *Journal of Vertebrate Paleontology* 19 (4): 666-80, doi: 10.1080/02724634.1999.10011180.
- Clark, W. C., and N. M. Dickson. 2003. Sustainability science: The emerging research program. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 100 (14): 8059-61, doi: 10.1073/pnas.1231333100.
- Cristelli, M., M. Batty, and L. Pietronero. 2012. There is more than a power law in Zipf. *Scientific Reports* 2: 812.
- Deng, J. 2010. *Introduction to grey mathematical resource science*. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press.
- Fisher, L. 2011. *Crashes, crises, and calamities: How we can use science to read the early-warning signs*. New York: Basic Books.
- Fragkias, M., J. Lobo, D. Strumsky, and K. C. Seto. 2013. Does size matter? Scaling of CO₂ emissions and US urban areas. *PLOS ONE* 8 (6): e64727, doi: 10.1371/journal.pone.0064727.
- Frey, H. 1999. *Designing the city: Towards a more sustainable urban form*. London and New York: Taylor and Francis Group/Spon Press.
- Gell-Mann, M. 2010. Transformations of the twenty-first century: Transitions to greater sustainability. In *Global Sustainability: A Nobel Cause*, eds. H. J. Schellnhuber, M. Molina, N. Stern, V. Huber, and S. Kadner, 1-7. Cambridge: Cambridge University Press.
- Helbing, D., J. Jost, and H. Kantz. 2008. Nonlinear physics everywhere: From molecules to cities. *The European Physical Journal B* 63(3): 283, doi: 10.1140/epjb/e2008-00248-0.
- Helbing, D., C. Kühnert, S. Lämmer, A. Johansson, B. Gehlsen, H. Ammoser, and G. B. West. 2009. Power laws in urban supply networks, social systems, and dense pedestrian crowds. In *Complexity perspectives in innovation and social change*, eds. D. Lane, D. Pumain, S. van der Leeuw, and G. B. West, 433-50. Netherlands: Springer, doi: 10.1007/978-1-4020-9663-1_17.
- Holland, J. H. 1998. *Emergence: From chaos to order*. New York: Oxford University Press.
- Hoppeler, H., and E. R. Weibel. 2005. Scaling functions to body size: Theories and facts. *Journal of Experimental Biology* 208 (9): 1573-4, doi: 10.1242/jeb.01630.
- Jacobs, J. 1961. *The life and death of great American cities*. New York: Vintage Books.
- Khare, A., and A. Lachowska. 2015. *Beautiful, simple, exact, crazy: Mathematics in the real world*. New Haven and London: Yale University Press.

- Kluger, J. 2008. *Simplexity: Why simple things become complex (and how complex things can be made simple)*. New York: Hyperion.
- Kühnert, C., D. Helbing, and G. B. West. 2006. Scaling laws in urban supply networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 363 (1): 96-103.
- Lai, S. K. and H. Han. 2014. *Urban complexity and planning: Theories and computer simulations*. United Kingdom: Ashgate Publishers.
- Liu, S. F., Z. G. Fang, and Y. Lin. 2006. A new definition for the degree of grey incidence. *Scientific Inquiry* 7 (2): 111-24.
- Liu, S., and Y. Lin. 2006. *Grey information: Theory and practical applications*. London: Springer-Verlag.
- Lobo, J., L. M. Bettencourt, D. Strumsky, and G. B. West. 2013. Urban scaling and the production function for cities. *PLOS ONE* 8 (3): e58407, doi: 10.1371/journal.pone.0058407.
- Otto, S. B., B. C. Rall, and U. Brose. 2007. Allometric degree distributions facilitate food-web stability. *Nature* 450 (7173): 1226-9, doi: 10.1038/nature06359.
- Partanen, J. 2015. Indicators for self-organization potential in urban context. *Environment and Planning B: Planning and Design* 42 (5): 951-71.
- Portugali, J. 2011. *Complexity, cognition and the city*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag.
- Portugali, J., H. Meyer, E. Stolk, and E. Tan, eds. 2012. *Complexity theories of cities have come of age: An overview with implications to urban planning and design*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Prange, H. D., J. F. Anderson, and H. Rahn. 1979. Scaling of skeletal mass to body mass in birds and mammals. *The American Naturalist* 113 (1): 103-22, doi: 10.1086/283367.
- Pumain, D. ed. 2006. *Hierarchy in natural and social sciences*. The Netherlands, Dordrecht: Springer.
- Samet, R. H. 2012. Complexity science and theory development for the futures field. *Futures* 44 (5): 504-13, doi: 10.1016/j.futures.2012.02.003.
- . 2013. Complexity, the science of cities and long-range futures. *Futures* 47: 49-58, doi: 10.1016/j.futures.2013.01.006.
- Schmidt-Nielsen, K. 1984. *Scaling: Why is animal size so important?* Cambridge: Cambridge University Press.
- Stumpf, M. P. H., and M. A. Porter. 2012. Critical truths about power laws. *Science* 335 (6069): 665-6, doi: 10.1126/science.1216142.
- West, B. J., and P. Grigolini. 2011. *Complex webs: Anticipating the improbable*. Cambridge: Cambridge University Press.
- West, G. B. 2006. Size, scale and the boat race; Conceptions, connections and misconceptions. In *Hierarchy in natural and social sciences*, ed. D. Pumain, 71-80. The Netherlands, Dordrecht: Springer, doi: 10.1007/1-4020-4127-6_4.
- . 2010. Integrated sustainability and the underlying threat of urbanization. In *Global Sustainability: A Nobel Cause*, eds. H. J. Schellnhuber, M. Molina, N. Stern, V. Huber, and S. Kadner, 9-18. Cambridge:

Cambridge University Press.

West, G. B., and J. H. Brown. 2005. The origin of allometric scaling laws in biology from genomes to ecosystems: Towards a quantitative unifying theory of biological structure and organization. *Journal of Experimental Biology* 208 (9): 1575-92, doi: 10.1242/jeb.01589.

Whitfield, J. 2006. *In the beat of a heart: Life, energy, and the unity of nature*. Washington D. C.: Joseph Henry Press.

2015 年 10 月 26 日 收稿

2016 年 5 月 2 日 修正

2016 年 8 月 22 日 接受