

從碳平衡觀點探討都市空間發展之特性

-以台灣各縣市為例

張學聖* 郭婷婷** 陳姿伶***

關鍵字：低碳城市，固碳效果，碳平衡

摘要

永續發展係指建構一個具有人性尺度的生態、生活、生產環境，城市為氣候變遷全球化與在地化之關鍵網絡節點，在永續發展過程中，扮演更為主導性的角色。近年來低碳城市(Low Carbon City)概念的崛起，為都市規劃領域依據永續發展與生態原則提出城鄉關係、交通運輸原則與土地利用規劃新思維。本文嘗試進行各都市發展之碳排推估與其綠環境固碳效果之關係討論，試圖透過碳平衡的觀點以檢視目前各都市規劃下發展程度與環境本身的調節能力，來檢視環境自我循環之生態平衡程度。文中分別以二種空間單元進行分析，研究結果顯示，若以「行政轄區」為空間單元進行檢視都市空間碳平衡，新北市與高雄市因具備天然林高覆蓋率，碳平衡結果較佳；若以「都市發展區」為空間單元，碳平衡結果顯示台灣地區縣市普遍面臨碳失衡的狀態，且高碳排放城市主要受產業的高度發展與集中、航空站與港口的貨物運輸需求及高人口集居所致，而不完備的綠地固碳之都市規劃，將導致都市發展程度超過自然環境負荷之狀態。討論結果期能供後續永續性都市發展與碳平衡城市建構規劃之參考。

The Research of Urban Spatial Development Feature from Carbon Neutral Perspective - A Case Study on Taiwan Cities

Hsueh-Sheng Chang* Ting-Ting Kuo** Tzu-Ling Chen***

KEYWORDS：Low Carbon City, Carbon Concentrating Mechanisms, Carbon Neutral

ABSTRACT

Sustainable development indicates to build up a humanity environment integrated ecology, living and economy. Cities are key nodes under climate change and localization, and will become predominant roles in sustainable development process. In addition, the concept of low carbon city leads new planning direction of the relationship between urban and country, communication and transportation principals and land uses based on sustainable development and ecological principal. This paper attempts to discuss the relationship between urban carbon emission and carbon concentrating mechanisms and further review the present development degree and the self-adjustment ability. The outcome shows that the cities in the west of Taiwan are mostly highly urbanized area and reveals high carbon emission in these cities. However, New Taipei City and Kaohsiung City have high natural forest coverage ratio and result in high carbon concentrating mechanisms in these two cities. As for the result of carbon neutral in urban developed area shows that almost every city faces on carbon un-neutral problem and comes out urban green area is unable to bear the high carbon emission came from urban developed area. Besides, high carbon emission cities cause by industries highly aggregated, the goods transportation demand and high population concentration plus incomplete carbon concentrating mechanisms in urban planning leads the serious impacts on natural environment. The discussed results are expected to be the reference for future sustainable development strategy and urban planning.

收件日期：2013.01.08；接受日期：2013.09.17

* 成功大學都市計劃學系副教授

Associate Professor, Department of Urban Planning, National Cheng Kung University, Taiwan

** 成功大學都市計劃學系碩士

Master, Department of Urban Planning, National Cheng Kung University, Taiwan

*** 成功大學都市計劃學系博士生(通訊作者 Email: skylight@mail2000.com.tw)

Ph. D Student, Department of Urban Planning, National Cheng Kung University, Taiwan

DOI: 10.3966/101632122014030087008

一、前言

根據聯合國人口基金會(UNFPA)發佈，全球人口統計已突破 70 億(UNFPA, 2011)，近 50 年全球人口數量增長 2.5 倍，人口數量的快速增長及人類社會經濟活動對大氣 CO₂ 濃度的升高和全球氣候暖化產生了決定性作用(IPCC, 2007)。全球都市發展蔓延過程，導致大量人口移往都市地區，鄉村農作土地的轉用及人口密集的結果，不僅增加二氧化碳的排放，亦減少綠地固碳量，甚而加劇都市環境議題，改變生態環境系統，更干擾生物圈系統(Imhoff, et al., 2004; Steffen, et al., 2004)。根據聯合國 2007 年的統計資料指出，都市地區於消費了 75% 能源的同時亦製造了 80% 的溫室氣體 (Chafe, 2007)。儘管目前於氣候暖化的成因解釋上尚存有疑義，但溫室氣體尤以二氧化碳(CO₂)濃度增加導致氣候暖化的觀點則多為共識。

國際間積極回應氣候變遷日趨嚴重之問題，1997 年 12 月聯合國氣候變化綱要公約通過執行具有法律效力的「京都議定書」(Kyoto Protocol)，以管制溫室氣體的排放。爾後為因應 2012 年京都議定書效期屆滿，各國代表亦於 2007 年達成峇里路線圖(Bali Roadmap)的峇里行動方案，確立於 2009 年的哥本哈根氣候會議上(COP15)，達成哥本哈根協定(Copenhagen Accord)，此協定中同意墨西哥領銜提出的「哥本哈根綠色氣候基金」的成立，以協助發展中國家進行「減緩森林退化、調適、能力建構、技術發展」等，會議過程熱烈討論的議題包括：2015 年及 2020 年減排碳目標、適應環境變遷策略、技術轉讓制度、經濟能源融資、國際合作框架等項目。2012 年 Rio+20 所揭示的綠色經濟願景，都市應持續經濟成長的穩定性與永續性，兼顧人類生活環境品質之維護與社會公平的維持，在不排斥發展和產出最大化落實都市的永續發展。

低碳城市(Low Carbon City)概念的崛起，為都市規劃領域依據永續發展與生態原則提出的城鄉關係、交通運輸原則與土地利用規劃新方向，人們亦逐漸認識到都市規劃及由此形成的城市型態是促進永

續發展的重要關鍵之一。低碳城市追求於實現能源利用轉型和經濟轉型的基礎上繼續保持經濟增長的穩定和永續性，且不排斥發展和產出最大化。然於滿足經濟發展所需的原料與動力後，其所產生的廢棄物因具有碳元素，得藉由碳循環方式由環境進入生物體內再釋回環境中，自然生態體系所具備自動修復機能(Regenerating Mechanism)，尤以緊鄰都市發展區之綠地資源，具發揮調節與淨化的功能，以降低空氣中的二氧化碳濃度。

有鑑於此，本文嘗試進行台灣各都市發展規劃碳排推估與其綠環境固碳效果之關係討論，試圖透過碳平衡的觀點以檢視目前各都市發展規劃與其環境本身的調節能力，來檢視環境自我循環之生態平衡程度，分析成果期能供後續永續性都市發展與碳平衡城市建構規劃之參考。全文除前言外，第二部分將進行永續都市空間與碳平衡之討論；第三部分為本文進行碳平衡之推估設計；第四部分進行都市地區排碳效果估算；第五部分為綠地固碳量評估；第六部分進行都市空間碳平衡討論，最後根據台灣各縣市碳平衡分析結果，研提結論與後續建議。

二、永續都市空間與碳平衡

城市是各國人口及經濟聚集中心，為能源主要消費地區，亦是溫室氣體重要的排放來源，其為氣候變遷全球化與在地化之關鍵網絡節點，在永續發展過程中，扮演更為主導性的角色。IPCC(2007)指出過去 50 年溫室氣體的劇增主要源於都市地區所造成的，儘管都市地區面積佔全球比例相對少(僅全球土地面積 2%)，但卻消費 75% 能源與製造 80% 溫室氣體(Svirejeva-Hopkins, et al., 2004; UN-Habitat, 2008)。都市化改變城市原始的植栽覆蓋與土地組成，人口的增加導致了都市地區的擴張，侵犯至周圍的天然與農業生態系統，此種土地使用改變情形的增加對碳循環產生巨大衝擊，亦為造成氣候與生態系統改變原因之一(Sala, et al., 2000; IPCC, 2001; Thomas, et al., 2004; Kirby & Potvin, 2007)。

兼顧環境與經濟的發展是現今規劃領域中不可

忽視的議題，都市的永續性乃規劃師關切的議題，普遍地將永續性作為規劃實務的基準性的指引。永續都市為經濟、社會與環境之間的長時間均衡發展之結果，而非短期或單一時間點的效益(Byrne, et al., 1994; Nijkamp & Perrels, 1994)。OECD 出版「1990 都市環境政策」(Environment Policies for Cities in the 1990) 報告書提出，達成永續都市的兩個原則，包括「機能與自我調節的成長原則」(the principle of functional and self-regulatory growth) 與「最少廢棄物原則」(the principle of minimum waste)。前者將都市系統視為一個整體，重新評量各部門經濟成長的淨貢獻價值，藉由回饋系統的建立，調節都市的成長；後者強調將物質回收機制納歸自然生態系統之運作(OECD, 1990)。

都市系統涵蓋複雜的自然元素與建成環境，該組成的複雜性為各部門訂立減排標準增添挑戰，加以不同的都市發展類型與條件為影響發展低碳城市推動策略之關鍵(Zellner, et al., 2008)。永續都市是一個社會經濟利益能夠與環境、能源議題和諧共進化(co-evolution)以確保長期變化的都市，城市的開發活動、汙染物、廢棄物以及產生的汗水不得超過生態系統的自淨功能或容受力，在不損及相關生態系統功能上的公平性與生產力前提下，對資源耗損及廢棄物產生所能忍受的最大量，以求得「地理公平」，即「自我調節」方式處理城市自身資源耗費(Maclaren & Des, 2001; Rees, 2004; McMillan & Woodruff, 2002)。

此外，除求得以「自我調節」方式處理城市自身資源耗費外，近年來愈來愈多研究聚焦討論碳吸收與碳儲存，諸如國際協定-京都議定書的淨化機制及其他碳減量計畫針對森林的碳匯進行深入討論(UNFCCC, 2005; Kirby & Potvin, 2008)。碳匯為物質歸結之所，自然界的碳被固定在海洋、土壤、岩石與生物體中。地球中四個主要碳庫，分別為大氣、海洋、化石燃料、陸地生態系統，森林陸地面積佔地球的35%，是陸地生態系統中最大的碳庫，森林植物吸收大氣中的二氧化碳並將其固定在植被或土壤中，從而減少該氣體在大氣中的濃度，是以在降低大氣中溫室氣體濃度、減緩全球氣候變暖中，具有十分重要的獨

特作用。

都市環境的碳平衡是不斷的調整綠色植物和各種排碳耗氧關係基礎上進行的，其平衡能力的大小對都市發展的永續性有潛在影響，其中綠地空間的植栽是都市中具有自我調節的能力的關鍵(林憲德, 2007)，藉由碳循環之過程，植物得將碳固著於植物體內形成有機碳，降低空氣中的二氧化碳濃度(Jo & McPherson, 1995; Jo, 2002; Nowak & Crane, 2002; Chiesura, 2004; Svirejeva-Hopkins, et al., 2004)，並藉此減緩全球氣候變遷。過去即有不少研究如 Rowntree (1990)、美國明尼蘇達州自然資源部門(Minnesota Department of Natural Resources) (1991)、Nowak (1993) 嘗試進行碳吸收量化之研究以進一步研提具發展潛力省能及碳減量之植栽配置策略。是以綠地空間植栽是都市規劃手法中重要的都市固碳標的。

鑑於日益攀升的二氧化碳濃度，綠地空間植栽的固碳重要性日益提高，多數研究指出將綠地功能運用到都市規劃過程中，將有利於都市空間的永續發展和都市生態環境改善。故本文嘗試就各都市碳排推估與不同類型綠環境之固碳量推估，以碳平衡角度，討論都市空間特性與碳平衡間之關係，研究結果嘗試作為都市發展空間規劃之參酌。

三、研究設計

本文嘗試針對「行政轄區」、「都市發展區」2種空間單元進行討論，透過推算各縣市能源消耗量以計算碳排放量；以及綠地品質、數量等進行固碳量推估，以進一步對都市空間碳平衡情形進行檢視。

3.1 碳排估算

過去研究對於碳排放之估算方式，常以部門別或產業別進行推估。部門別的碳排計算中，王安民(1999)以營建、交通運輸、工業、住宅、商業、建築拆除、都市廢棄物燃燒及消費部分進行推估，林孟儒(2002)以工業、交通運輸、住宅、商業、營建、廢棄物燃燒進行推估，王珮琪(2005)以人口、交通、產業、都市營建進行推估；IPCC 及高雄市溫室氣體盤查及減量

策略計畫(高雄市政府環境保護局，2006)等，亦是將二氧化碳排放量估算分成七大部門；產業別的碳排計算中，多以工業部門的產業為主要的研究對象，尤以傳統高耗能產業如水泥業(馮炳勳及陳家榮，2003；蘇茂豐等，2005)、製造業(王京明等，1996)、服務業(林建廷，2009)等。

根據財團法人台灣綜合研究院研究，化工業、非金屬礦物製品業及金屬基本業乃高耗能及高二氧化碳排放的產業。且根據經濟部能源局歷史資料顯示，上述能源密集產業所消耗的能源占全國最終能源消費的比重高達三分之一以上。我國運輸部門為僅次於工業部門的高二氧化碳排放部門，又以公路運輸之石油產品消耗與汙染物排放佔最大比例且逐年增加。近年來，住宅及商業部門能源消耗量亦逐年攀升，能源消費主要以電力消費為主，其中與樓地板面積增加及全國住宅戶數增加為主要關鍵因素(黃群達，2006)。且「聯合國氣候變化綱要公約」鼓勵有詳細的能源使用資料的國家，依據「部門方法」的分類方式計算，是以，部門別較產業別推估碳排總量較符合現階段台灣都市發展情形。

本文參考前述研究，以部門別進行碳排量計算，部門別為由「最終消費部門」計算其能源消費所產生之二氧化碳排放量，為一種由下至上(bottom-up)的方法(經濟部能源局，2012)。其中住宅部門的電力消耗量統計資料源於台灣電力公司各縣市之統計，運輸部門的油耗統計源於經濟部能源局各縣市加油站的汽柴油消耗量統計資料，其餘各部門碳排推估立基於經濟部能源局 97 年能源平衡表(熱值單位)，各部門最終能源消費量並進行單位轉換。惟該資料為全國性的總計資料，是以將進一步輔以 97 年經濟部能源局能源平衡表內的七大部門的業別及 95 年工商普查之工業及服務部門中細行業別進行各縣市碳排推估。(如表 1 所示)。

除住宅部門與運輸部門外，其餘部門碳排推估乃依據能源平衡表的歸類方式，共分為四大類能源使用：分別為煤及其產品、原油及其產品、天然氣及其產品、電力，而非能源使用、國際航運與國際航空之能源消費量，在計算二氧化碳排放量時不予以納入。

非能源項目計有無煙煤、焦炭、潤滑油、柏油、溶劑油、石油焦、其他石油產品、石油腦與液化石油氣等(經濟部能源局，2008)。

- A.煤及其產品：包括煤炭、自產煤、進口煤、進口原料煤、進口燃料煤、焦煤、煤球、煤氣及高爐氣等九類。
- B.原油及其產品：包括原油、液化油、煉油氣、液化石油氣、天然汽油、車用汽油、煤油、柴油、燃料油、潤滑油、柏油、溶劑油、石油腦、烯烴類、芳香烴類及其他石油品等十六類。
- C.天然氣及其產品：包括液化天然氣與天然氣等兩類。
- D.電力：包括水力發電、火力發電、核能發電、汽電共生發電等四類。

承上述，將能源消費量乘以二氧化碳排放係數，可得各部門燃料燃燒二氧化碳排放量。本文彙整過去研究化石燃料的煤炭、石油、天然氣、電力碳排放計算公式，包括考量有效氧化係數、標準煤的含碳量及相同熱能石油和天然氣釋放的二氧化碳與燃煤釋放的二氧化碳之比(王永安及恭映璧，2002；肖慧娟等，2006；張穎等，2007；Zhang, et al., 2007；經濟部能源局，2008)，如表 2 所示，以作為後續碳排推估參數的參考依據。

3.2 固碳量推估

綠地，泛指存在實質環境中的各式綠色空間(Green Space)，依其自然條件係指保持著植物穩定成長之土地與水域，它包含單一植物個體或整體樹林與植物覆蓋之群落。其可分為狹義和廣義兩類：狹義綠地定義如根據台灣都市計畫法第 42 條與 45 條之規定，都市公園綠地係指都市計畫區公園、綠地、廣場、兒童遊樂場等公共設施。廣義綠地如根據內政部營建署所舉辦之「全國公園綠地會議(1996)」中經各專家學者多次討論所凝聚之共識為具宏觀之界定，泛指穩定保持著植物生長的土地或水域，其廣義定義係指可供生態保育、生態、景觀、防災、遊憩等多重功能之開放空間。

表 1 能源平衡產業別細項

部門別	業別
能源部門	煤礦業、煤製品業、石油天然氣及地熱礦業、石油煉製業、電力供應業、氣體燃料供應業
運輸部門	航空、公路、鐵路、水運
工業部門	礦業及土石採取業、食品飲料菸草製造業、紡織業、成衣服飾品製造業、木紙業、化工業、非金屬礦物製品製造業、金屬基本工業、其他製造業
農林漁牧部門	農牧業、林業、伐木業及農田水利業、漁業
住宅部門	-
商業部門	批發、零售、國貿及餐飲業
其他部門	用水供應業、營造業、運輸服務業、倉儲業、通信業、金融保險不動產業及工商服務業、公共行政、其他

資料來源：97 年經濟部能源局能源平衡表

註 1：上表為 97 年經濟部能源局能源平衡表部門別與業別資料，輔以 95 年工商普查之工業及服務部門中細行業別統計資料進行各縣市各部門碳排放推估。

註 2：住宅部門統計資料為台電公司各縣市電力消耗量；運輸部門的油耗為各縣市加油站的汽柴油消耗量統計資料。

表 2 碳釋放源計算公式

碳釋放源	變數	計算公式	相關文獻
化石燃料燃燒	煤炭	耗煤量(t/a)×0.982×0.73257	王永安及恭映璧(2002)、肖慧娟等(2006)、張穎等(2007)、Zhang et al. (2007)
	石油	耗油量(t/a)×0.982×0.73257×0.813	
	天然氣	耗氣量(t/a)×0.982×0.73257×0.561	
其他	電力	耗電量(t/a)×0.982×0.73257×0.813×0.0956	經濟部能源局(2008)

資料來源：本文整理

註：其中 0.982 為有效氧化係數，0.73257 是標準煤的含碳量，0.813 和 0.561 分別是在獲得相同熱能的情況下，石油和天然氣釋放的二氧化碳與燃煤釋放的二氧化碳之比。

國際間自 1990 年初期各國之林業部門即已進行估算森林資源碳量貯存與吸存能力之工作，近年來許多研究針對二氧化碳之固定效果進行實際測量之推估，已初步建立植物二氧化碳固碳效能資料庫，如楊士弘(1996)運用實測方式調查北京常見樹木二氧化碳固碳量、劉常富等(2008)提出樹齡類型會影響碳儲存與固碳率、彭立華等(2007)提出不同林齡植被的碳儲存與碳削減係數等。IPCC 針對林木固定碳素效益之建議估算原則，為林木之生物量係利用林木平均比重乘以林木樹幹部分之木材材積，再乘以全株材積與幹材材積之比例（一般全株材積約為幹材材積之 1.3~2.0 倍，平均值約為 1.65 倍）轉換而得，林木生物量最後再乘以林木之碳含量百分比，即為林木所固定之碳素量。內政部建築研究所(2012)提出台灣各類植栽單位面積 40 年 CO₂ 固定量之研究報告，將綠化植栽分為生態複層、喬木、灌木等七類，各植物一年固碳值從草坪每平方公尺固定 0.5kg，到生態複層每

平方公尺固定 30kg(如表 3 所示)。

綠地所覆蓋之植栽對二氧化碳減量之相關研究中，多數研究皆認為闊葉林對於二氧化碳之吸收與氧氣釋放的效率較高(李敏，1999；戴天興，2002)，至於固碳量最低為農地(林憲德，2005)，是以相關研究多依樹種差異(謝漢欽等，2003；吳俊賢等，2005；郝婷婷及李順龍，2006；謝軍飛等，2007)、綠地類型(肖慧娟等，2006)或其他不同土地使用類型(張穎等，2007)進行綠地植栽固碳量推估。由於綠地植栽的固碳量會受到不同氣候條件而有所差異，加以綠地所覆蓋之植栽具差異性，因此本文參考過去研究固碳量推估方式，兼顧樹種與綠地類型，根據內政部建築研究所(2012)針對不同綠地覆蓋植栽之比例進行固碳量之基礎分類資料，針對不同綠化植栽比例推算各類綠地固碳量。

台灣各縣市綠地植栽覆蓋情形尚未有完整比較分析資料，本文採用內政部營建署民國 87 年完成之

表 3 台灣各種植栽單位面積 40 年 CO₂ 固定量表

植栽類型	CO ₂ 固定量 Gi (kg/m ²)	植物一年固碳值 (kg/m ²)	覆土深度
生態複層	大小喬木、灌木、花草密植混種區 (喬木間距 3.0m 以下)	1200	30
喬木	闊葉大喬木	900	22.5
	闊葉小喬木、針葉喬木、疏葉喬木	600	15
	棕櫚類	400	10
灌木 (每 m ² 至少栽植 4 株以上)	300	7.5	0.5m 以上
多年生蔓藤	100	2.5	
草花花園、自然野草地、水生植物、草坪	20	0.5	0.3m 以上

資料來源：「綠建築解說與評估手冊」(內政部建築研究所，2012 更新版)

公園綠地規劃準則，其中陳青洲(2006)與羅仁豪(2004)研究調查結果顯示，都市公園植被、綠覆率、保水效益與內政部營建署之公園綠地規劃準則一致。此外依據行政院農業委員會林務局之第三次森林資源調查報告，台灣森林覆蓋率占 58%，農業用地約占 29%，兩項合計占全島土地總面積的 87%，而其餘 13% 土地分布於平原及丘陵地區，屬於都市、城鎮、道路、工業用地及河川、海灘與濕地等。林相方面，行政院農業委員會林務局(2005)依據數化像片基本圖分析結果，森林地中以闊葉樹林面積為大宗，約佔台灣全島總面積之 31%；其次為針葉樹林，約佔台灣全島總面積之 12.21%；針闊葉混合林名列第三，約佔台灣全島總面積之 10.89%。

是以，本文根據 97 年都市及區域發展統計彙編之資料，以都市計畫土地使用分區中的公共設施用地—公園、綠地、廣場、兒童遊戲場，與非都市土地使用分區中的農業區、保護區和風景區，以及非都市土地使用分區編定面積中的六大綠地—國家公園區、森林區、山坡地保育區、風景區、特定農業區及一般農業區為綠地植栽固碳量之推估對象。都市計畫區內的綠地植栽固碳量分析，本文以內政部營建署 87 年公園綠地規劃準則(如表 4)為基礎進行固碳量之估算，採用平均值方式建立不同固碳量的類型。都市綠地綠覆率為 80% 以上，固碳量最高，其次為公園、兒童遊戲場和廣場。至於其他非都市發展用地中，參考行政院農業委員會林務局(2005)數化像片基本圖分析結

果，各類綠地植栽固碳量推估假設如下(如表 5 所示)：

- A. 農業區農地的固碳量最低，與草地固碳量相同，其固碳量約為 5t/ha¹；
- B. 台灣主要有 13 個風景區，且多數風景區位於陸域地區並靠近森林區，風景區林相主要為闊葉小喬木、針葉喬木、疏葉喬木，因此假設其喬木所佔比例為 70%，灌木為 30%，其綠覆率面積為 80%，其固碳量約為 100t/ha²；
- C. 保護區可以分為動物和植物兩種，其綠地植栽固碳量比風景區少，研究假設其為風景區的 40%，其固碳量約為 40t/ha³；
- D. 國家公園與森林區較少人為破壞，因此其綠覆率面積較高，主要以闊葉林為主，因此研究假設其為闊葉大喬木之二氧化碳固定量 900(kg/m²)，綠覆率面積佔 80%，其固碳量約為 180t/ha⁴；
- E. 山坡地保育的綠地固碳量僅次於森林區，本文採用闊葉小喬木、針葉喬木、疏葉喬木的二氧化碳固定量 600(kg/m²)，假設其綠覆率面積 80%，其固碳量約為 120t/ha⁵。

四、台灣都市地區碳排估算

本文依研究設計之推估方式，進行各縣市各部門之碳排放計算，各縣市能源、運輸、工業、農林漁牧、住宅、商業及其他部分的碳排放量推估值顯示(如圖 1 所示)，19 個縣市主要碳排放量集中於北部地區，北部地區中又以新北市居全台之冠，新北市排碳量高達

表 4 各類公園綠地設計準則

	建蔽率	容積率	綠覆率	喬木佔綠覆面積	灌木佔綠覆面積	草坪及其他飾景佔綠覆面積
兒童遊戲場	10%以下	30%以下	50%以上	30%以上	30%以上	40%左右
鄰里公園	15%以下	30%以下	60%以上	30%以上	30%以上	40%左右
社區公園	15%以下	30%以下	60%以上	30%以上	30%以上	40%左右
市鎮公園	12%以下	30%以下	60%以上	30%以上	30%以上	40%左右
廣場	10%以下	10%以下	30%以上	50%以上	50%以上	50%以上
綠地	0%以下	0%以下	80%以上	35%以上	35%以上	30%左右

資料來源：內政部營建署 87 年公園綠地規劃準則。

表 5 各種綠地固碳量參數假設及固碳效益(單位：t/ha)

土地使用	類別	建蔽率	綠覆率	固碳效益	
都市計畫區	公園	15%以下	60%	40 ⁶	
	綠地	0%以下	80%	60 ⁷	
	兒童遊戲場	10%以下	50%	35 ⁸	
	廣場	10%以下	30%	35 ⁹	
	農業區	生產綠地	10%	-	5
	保護區	保育綠地	20%	-	40
	風景區	風景綠地	20%	80%	100
非都市土地使用分區	國家公園區	-	80%	180	
	森林區	-	-	180	
	山坡地保育區	-	80%	120	
	風景區	風景綠地	-	80%	100
	特定農業區	生產綠地	-	-	5
	一般農業區	生產綠地	-	-	5

資料來源：本文整理

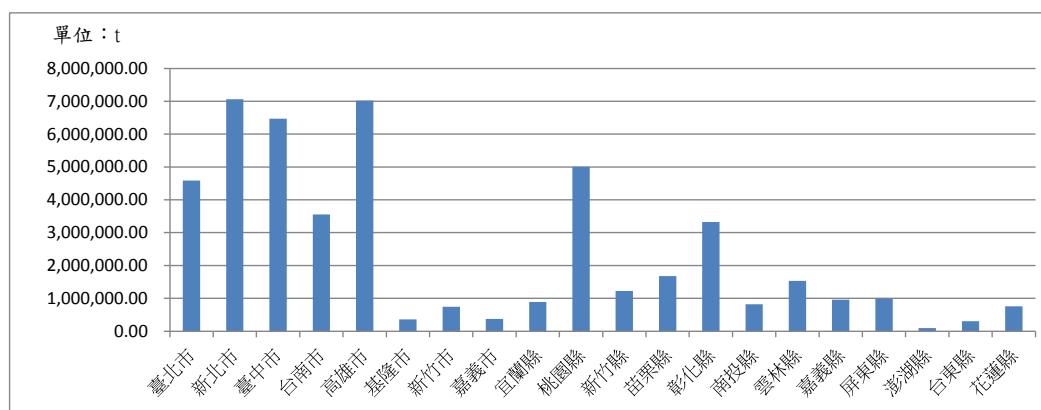


圖 1 2008 年台灣地區各縣市碳排放量

資料來源：97 年經濟部能源局能源平衡表(經濟部能源局，2008)；97 年台灣電力公司；97 年經濟部能源局；本文整理

約 7,064,600 公噸，其次為高雄市、臺中市、桃園縣及臺北市，此五個縣市之碳排放量佔全台的 55%，最低則為東部地區。

各部門的碳排放量計算結果(如表 6 與圖 2 所示)：工業部門是碳排放的大宗，共計約 28,045,100 公噸的碳排放量，佔總量的 59.12%，其次為運輸部

門共計約 9,882,300 公噸，約為工業部門的三分之一，再者為住宅部門佔 9.71%，其他依序為能源部門(4.86%)、商業部門(3.69%)、其他部門(1.59%)、農林漁牧部門(0.20%)。至於能源別方面(如圖 3 所示)，四大能源中以原油碳排放量最高，佔 51.80%，其次為煤炭佔 19.02%，原油與煤碳為工業與運輸部門主要

資源消耗。

由於工業、運輸及住宅三個部門乃碳排放最主要的產生源，因此本文以此三部門碳排放量進行各縣市碳排之分析。

4.1 工業部門

工業部門中所包含的產業別最廣也最多，大致可以分為 8 大類，如圖 4 所示，礦業及土石採取業、食品飲料菸草製造業、紡織業、成衣服飾品製造業、木紙業、化工業、非金屬礦物製品製造業、金屬基本工業、其他製造業。八大產業的碳排放量中，最耗能的產業為化工業，佔 58.53%，其次為金屬基本工業 15.96%，再者為其他製造業 10.72%，化工業的耗能產業主要是來自於化學材料製造業，包括煤炭、原油或是電力消耗都是工業部門的前三名，同時亦為高碳排放量產業；其次為金屬基本工業中的鋼鐵業，鋼鐵業消耗大量的煤炭，所以碳排放量也較高。

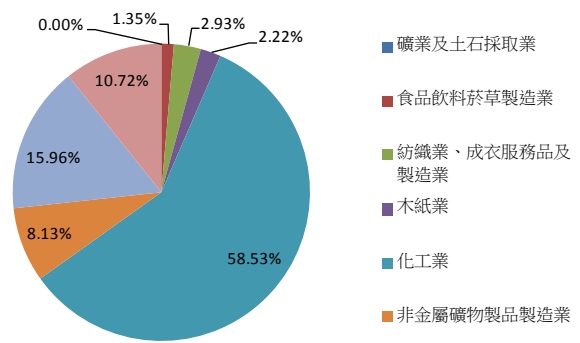


圖 4 台灣地區工業部門八大產業碳排放量

資料來源：97 年經濟部能源局能源平衡表(經濟部能源局，2008)；本文整理

台灣地區各縣市工業部門碳排放量，以高雄市共計約 4,464,600 公噸居冠，其次為新北市共計約 4,323,700 公噸，臺中市共計約 4,048,300 公噸位居第三，根據 95 年工商普查的調查報告指出，鋼鐵業場所單位共計約 2,624 家，北部和中部地區佔了三分之二以上，尤以新北市、臺中市與桃園縣佔據一半以上；化工業中化學材料製造業以桃園縣場所單位數最

表 6 各部門四大能源碳排放量(單位：t)

部門	煤炭	原油	天然氣	電力	總計
能源部門	0	1,217,843	180,906	903,132	2,301,881
運輸部門	0	9,882,302	0	0	9,882,302
工業部門	9,022,548	12,104,068	425,420	6,493,023	28,045,059
農林漁牧部門	0	2,381	0	91,632	94,013
住宅部門	0	987,690	371,281	3,249,307	4,608,279
商業部門	0	340,417	132,372	1,276,466	1,749,255
其他部門	0	36,834	702	717,020	754,555

資料來源：97 年經濟部能源局能源平衡表(經濟部能源局，2008)；97 年台灣電力公司；97 年經濟部能源局；本文整理

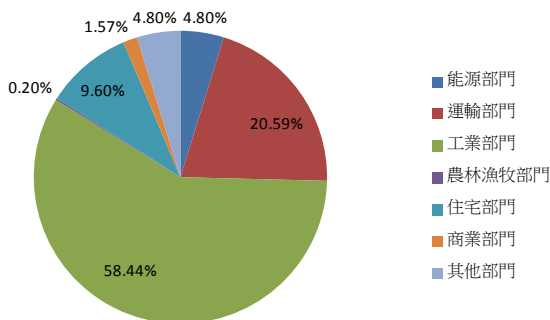


圖 2 台灣地區 2008 年各部門碳排放量比例

資料來源：97 年經濟部能源局能源平衡表(經濟部能源局，2008)；97 年台灣電力公司；97 年經濟部能源局；本文整理

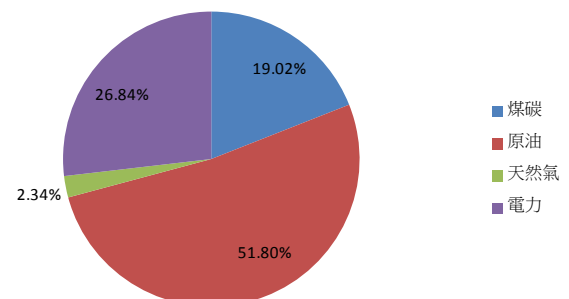


圖 3 台灣地區 2008 年四大能源碳排放比例

資料來源：97 年經濟部能源局能源平衡表(經濟部能源局，2008)；97 年台灣電力公司；97 年經濟部能源局；本文整理

多，全台 369 家其佔了 78 家，至於化工業中石化原料業主要分布於台北市及高雄市，台灣地區總計有 127 家，台北市及高雄市各佔了五分之一；水泥及水泥製品製造業全台共有 1,061 家，其中新北市佔 10% 左右，台中市約 9% 左右，桃園縣約 8% (如圖 5 所示)。

4.2 運輸部門

運輸部門的能源消耗主要是以原油為主，又分為汽油和柴油兩類，至於鐵路、水運及空運主要乃供國際間貨運或城際間轉乘需求，較難歸納分配至各縣市之能源消費，加以各縣市的鐵路延哩長度不同，以長度換算電力消耗量將出現不公平現象，是以本文未納入碳排之推估計算中。此外，根據經濟部能源局能源平衡表(經濟部能源局，2008)顯示，運輸部門能源消耗主要來自於汽柴油，即公路系統，其次才為航空，其他運具所消耗的原油量甚少。因此，本文主要以公路系統為主要的分析對象，並根據經濟部能源局 2008

年各月份加油站統計資料進行分析。

推估結果顯示，新北市運輸部門的碳排最高，其碳排放高達約 1,260,700 公噸；其次為桃園縣共計約 1,130,600 公噸；第三為台中市約 1,305,000 公噸(如圖 6 所示)。根據 2008 年交通部統計要覽統計台灣地區機動車數量主要以機車為主佔 68%；新北市、台北市及高雄市機動車輛最多，又以新北市及桃園縣碳排放量最多，而桃園縣的碳排放量比例相當於新北市，潛在原因包括桃園中正機場座落於該縣內，為國內重要門戶，是以都市空間碳排高可能為旅運需求所致。

4.3 住宅部門

根據經濟部能源局能源平衡表顯示，本部門主要能源消耗來自於電力消費，其次為原油及產品，對住宅使用者而言，主要是使用原油衍生產物—液化石油氣(LPG)，其功能和天然氣相同，主要是用來提供住宅熱源。住宅部門碳排計算是以戶數為權重，乘上四

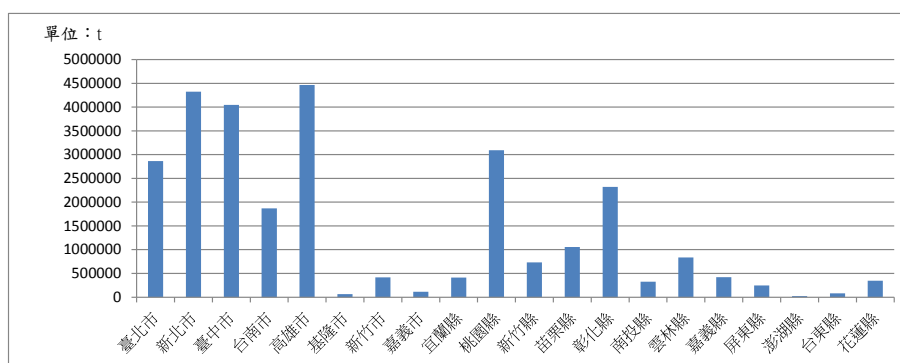


圖 5 台灣地區各縣市工業部門碳排放量

資料來源：97 年經濟部能源局能源平衡表(經濟部能源局，2008)；本文整理

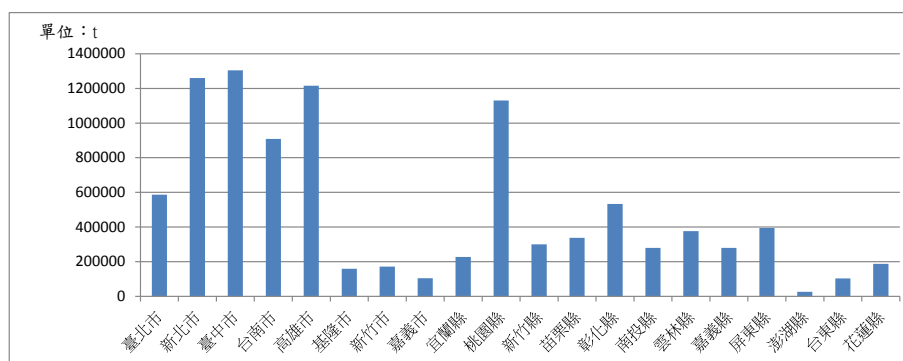


圖 6 台灣地區各縣市運輸部門碳排放量

資料來源：97 年經濟部能源局各縣市加油站汽柴油統計資料；本文整理

大能源消耗量。電力消費使用台灣電力公司 2008 年各縣市統計資料，其分為電力及電燈兩大用電，電力主要是產業用電，不列入考慮，本文主要是採用電燈消耗量，其主要是供給各縣市之民生用電，因此本部門之電力採用電燈消耗量作為後續推估之資料來源(如表 7 所示)。

結果顯示，北部地區住宅的碳排佔據全台灣半數以上，尤以新北市共計約 833,000 公噸位居第一位，其次為臺北市約 592,100 公噸，再者為桃園縣約 403,500 公噸，至於其他直轄市包括臺中市、高雄市與臺南市於住宅的碳排亦為前幾名(如圖 7 所示)。

五、綠地固碳量推估

台灣本島土地面積為 3,591,500 公頃，其中森林地面積為 2,102,400 公頃，約佔 59%。森林地以闊葉樹林面積為大宗，約佔台灣全島總面積之 31%，主要集中於中央山脈地區，因此新北市、宜蘭縣、基隆市、新竹縣、苗栗縣、台中市、南投縣、嘉義縣、高雄市、屏東縣、台東縣、花蓮縣等縣市，森林覆蓋率高達 50% 以上；彰化縣、台南市、嘉義市、雲林縣則因位於沿海地帶，森林覆蓋面積較低，森林地面積中又可進一步細分為四類，闊葉林、針葉林、針闊葉混合林、竹林，以闊葉林所佔的面積最高，其次為針葉林和針闊葉混合林，闊葉林每年可以吸收一公噸的二氧化碳，其固碳效益為其他樹種中最高(如表 8 所示)。

台灣地區都市計畫土地使用分區內，綠地面積所佔的比例約為 50%，其中保護區為 130,600 公頃，農業區約 94,500 公頃，風景區為 4,218 公頃，以保護區所佔比例最高。非都市土地中，綠地面積共計約 2,553,200 公頃，佔非都市土地使用分區面積的 95%，其在二氧化碳減量上有相當的優勢，未來非都市發展區可能成為都市之肺，成為都市地區氧氣及固碳功能的提供者，對於二氧化碳的減量有相當的能力。

惟都市發展區往往為高碳排地區，因而都市綠地規劃為都市碳平衡發展關鍵，因此本文以下進一步分別以行政轄區與都市發展區二種不同分區單元，進行綠地固碳效益分類，行政轄區界包含都市土地及非都市土地中的綠地，都市發展區綠地僅針對都市計畫區內的公共設施用地—公園、綠地、廣場和兒童遊戲場作綠地固碳量之估算，估算時以各類綠地之規劃準則為推算之基礎，綠地分類如表 9 所示，都市計畫區土地使用分區面積比例如圖 8 所示，非都市土地使用分區面積比例如圖 9 所示。

台灣各縣市行政轄區綠地固碳量以花蓮縣、嘉義縣、南投縣、台東縣最多，皆超過每年四千萬公噸的綠地固碳量，其森林區和國家公園區的面積達到 19 萬公頃，擁有大量的高固碳量綠地，因而其固碳量相較其他縣市高(如圖 10 所示)。至於都市綠地固碳量，各縣市的都市綠地固碳量普遍落於三萬公噸以下，除新北市外，其都市綠地固碳量最高(如圖 11 所示)。

表 7 住宅部門能源消費結構

煤及煤產品(公噸煤當量)	原油及產品(公秉油當量)	天然氣(千立方公尺)	電力(千度)
0	1,372,967	919,983	42,685,280

資料來源：97 年經濟部能源局能源平衡表(經濟部能源局，2008)；97 年台灣電力公司電力消耗統計資料

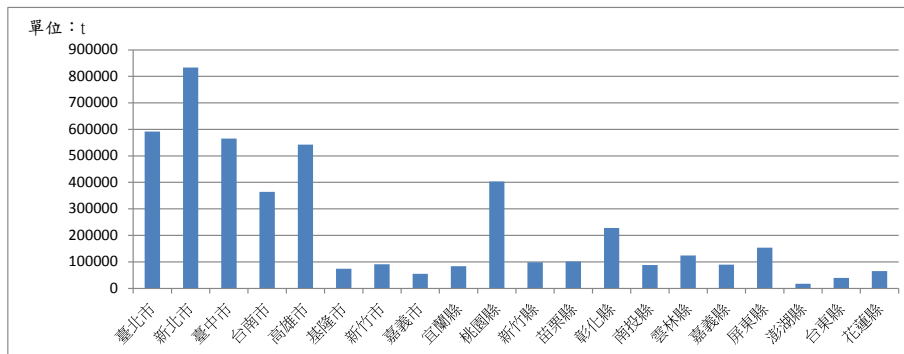


圖 7 台灣地區各縣市住宅部門碳排放量

資料來源：97 年台灣電力公司電力消耗統計資料；本文整理

表 8 各縣市森林地面積及森林覆蓋率

土地利用型	森林地面積					非森林面積 (ha)	總計 (ha)	森林覆 蓋率 (%)
	總計 (ha)	針葉樹林 (ha)	針闊葉混淆林 (ha)	闊葉樹林 (ha)	竹林 (ha)			
總計	2,102,400	438,500	391,200	1,120,400	152,300	1,489,100	3,591,500	59
台北市	10,700	300	400	8,200	1,800	16,300	27,000	39.63
台中市	110,500	49,700	29,500	25,300	6,000	109,400	219,900	50.25
高雄市	172,900	39,500	31,000	87,000	15,400	125,600	298,500	57.92
台南市	41,500	200	9,100	16,100	16,100	183,800	225,300	18.42
新北市	139,700	20,200	14,900	95,000	9,600	65,700	205,400	68.01
宜蘭縣	163,700	36,700	22,400	101,900	2,700	54,600	218,300	74.99
基隆市	9,100	300	88	8,000	700	4,200	13,300	68.42
桃園縣	42,200	7,500	6,400	21,800	6,500	77,800	120,000	35.17
新竹縣	98,700	27,900	15,400	44,400	11,000	43,100	141,800	69.61
苗栗縣	122,000	27,900	16,200	62,600	15,300	58,700	180,700	67.52
新竹市	2,000	4	100	1,800	100	8,600	10,600	18.87
彰化縣	6,000	3	-	4,800	1,200	104,100	110,100	5.45
南投縣	298,000	89,500	91,200	95,000	22,300	100,700	398,700	74.74
雲林縣	15,800	1,300	1,000	6,500	7,000	115,400	131,200	12.04
嘉義縣	83,200	13,700	24,900	22,900	21,700	108,200	191,400	43.47
嘉義市	300	4		200	98	5,400	5,700	5.26
屏東縣	146,700	2,200	7,200	136,400	900	131,200	277,900	52.79
台東縣	279,900	27,600	48,700	198,300	5,300	76,900	356,800	78.45
花蓮縣	359,500	94,000	72,700	184,200	8,600	99,400	458,900	78.34

資料來源：林務局森林資源調查專案成果(行政院農業委員會林務局，2005)

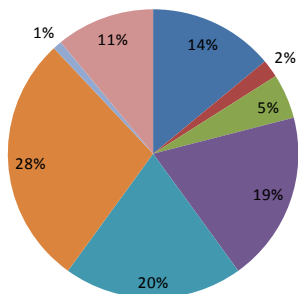


圖 8 台灣地區 2008 年都市計畫區土地使用分區面積比例

資料來源：97 年都市及區域發展統計彙編；本文整理

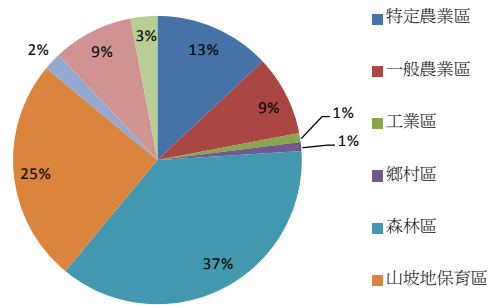


圖 9 台灣地區 2008 年非都市土地使用分區面積比例

資料來源：97 年都市及區域發展統計彙編；本文整理

表 9 綠地分類表

類別	資料來源	細項	綠地別
行政轄區	都市計畫土地使用區	都市發展用地	公園、綠地、兒童遊戲場、廣場
		非都市發展用地	農業區、保護區、風景區
	非都市土地使用分區	非都市發展用地	國家公園區、森林區、風景區、山坡地保育區、特定農業區、一般農業區
都市發展區	都市計畫土地使用區	都市發展用地	公園、綠地、兒童遊戲場、廣場

資料來源：本文整理

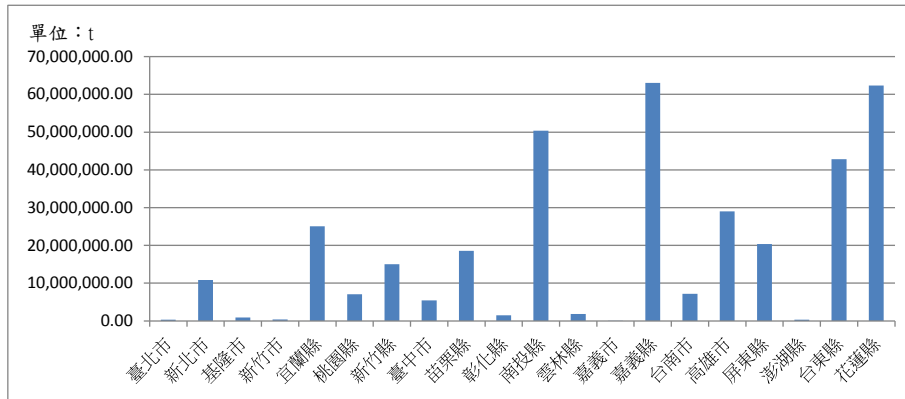


圖 10 2008 年各縣市行政轄區內綠地固碳量

資料來源：97 年都市及區域發展統計彙編；內政部營建署 87 年公園綠地規劃準則；本文整理

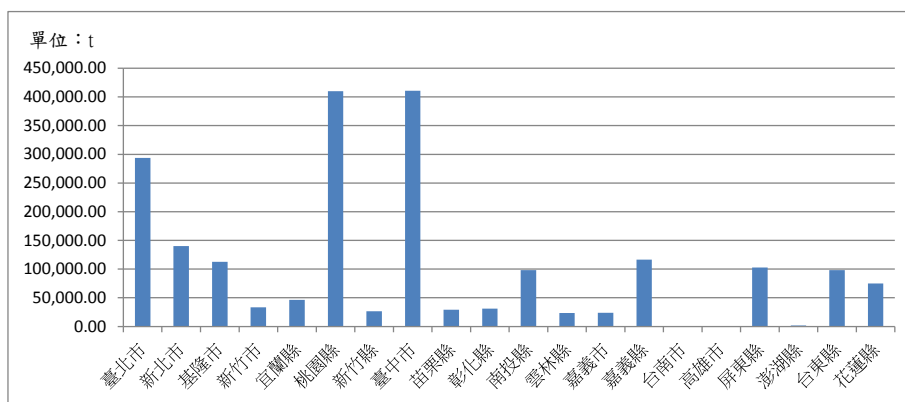


圖 11 2008 年各縣市都市綠地固碳量

資料來源：97 年都市及區域發展統計彙編；內政部營建署 87 年公園綠地規劃準則；本文整理

六、都市空間碳平衡討論

本文主要是以碳平衡觀點切入討論台灣地區各縣市之碳排情形與綠地植栽的固碳效益，以檢視台灣各都市規劃發展碳平衡情形。台灣地區各縣市行政轄區碳平衡比較分析圖得知(如圖 12 所示)，高碳排、高固碳為新北市與高雄市，低碳排、高固碳為嘉義縣、花蓮縣、南投縣、台東縣、宜蘭縣、屏東縣、苗栗縣、新竹縣，高碳排、低固碳為台中市、桃園縣、台北市、台南市、彰化縣，低碳排、低固碳為雲林縣、新竹市、基隆市、嘉義市、澎湖縣。

研究結果顯示天然綠地資源較多的縣市，包括宜蘭縣、南投縣、嘉義縣、台東縣及花蓮縣，相對於其他較高密度發展的縣市而言，其有較多的固碳量，至於高碳排地區包括，北部地區為臺北市及其周邊的縣市，中部地區則是以彰化縣和台中市最為嚴重。南部

地區工業城市高雄市因縣市合併後，儘管其碳排放高居第二名，惟原高雄縣大量綠地部分平衡了原高雄市的高排碳，東部地區則呈現平衡狀態。

至於都市發展區碳平衡發展情形，根據台灣地區各縣市都市發展區碳平衡比較分析圖(如圖 13 所示)可知，高碳排、低固碳為台北市、台中市、高雄市、台南市、桃園縣、新北市，至於其他縣市多為低碳排、低固碳，包括基隆市、苗栗縣、新竹縣、屏東縣、雲林縣、嘉義縣、宜蘭縣、南投縣、新竹市、台東縣、嘉義市、澎湖縣、彰化縣。研究結果顯示，台灣地區各縣市若以都市地區範圍觀察，其皆處於碳失衡狀態，顯示出目前都市發展區之能源消耗所帶來的環境影響，現有的都市綠地面積之固碳效益無法滿足碳平衡下的空間發展需求，尤其是高碳排放量的新北市、桃園縣、高雄市、台中市、台北市及台南市相對情況較為嚴重。

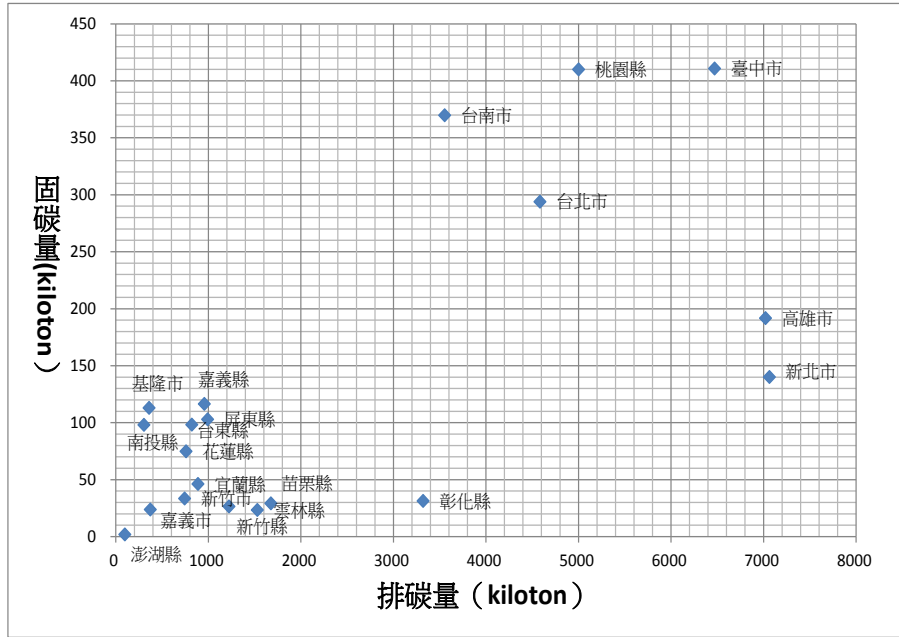


圖 12 台灣地區各縣市行政轄區碳平衡比較分析圖

資料來源：97 年經濟部能源局能源平衡表；97 年台灣電力公司；97 年經濟部能源局；97 年都市及區域發展統計彙編；內政部營建署 87 年公園綠地規劃準則；本文整理

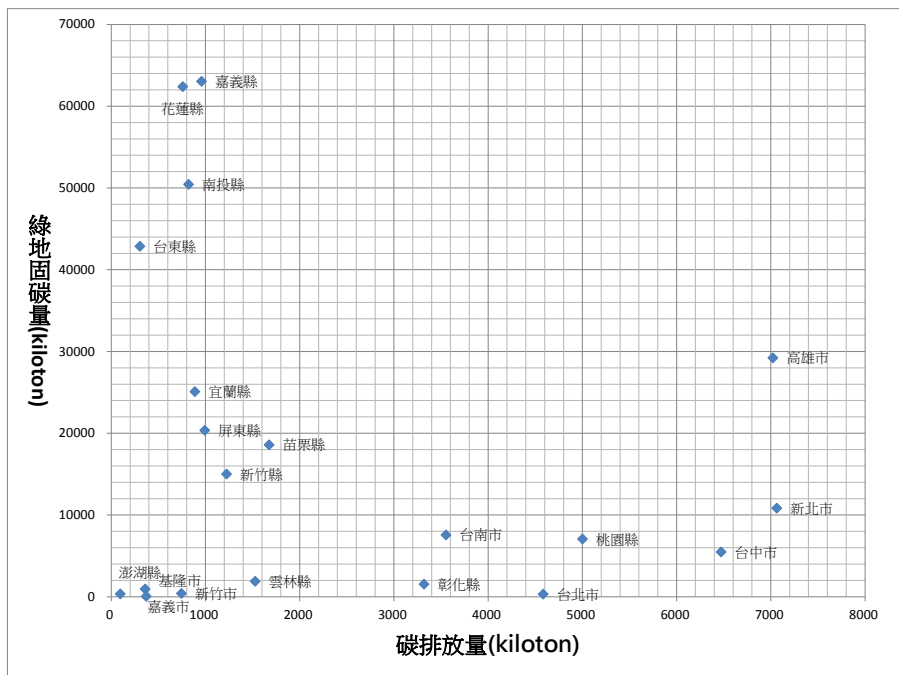


圖 13 台灣地區各縣市都市發展區碳平衡比較分析圖

資料來源：97 年經濟部能源局能源平衡表(經濟部能源局，2008)；97 年台灣電力公司；97 年經濟部能源局；97 年都市及區域發展統計彙編；內政部營建署 87 年公園綠地規劃準則；本文整理

總結台灣地區目前都市發展區綠地規劃是無法滿足其碳平衡之需求的，且可進一步概分成三級。第一級為失衡較嚴重的城市包括高雄市、台中市、臺北市、桃園縣、新北市，超過四百萬噸，其次為彰化縣

和台南市約兩百萬至三百萬噸，其他縣市則約為一百萬噸。是以，本文進一步歸類高碳排放量之縣市發展類型，高雄市、新北市與台中市佔據工業部門排碳量之前三名，顯示此三縣市在工(產)業發展範疇為最高

碳排地區；桃園縣、台中市與高雄市佔據運輸部門碳排量之前幾名，顯示上述三縣市除為台灣重要國際轉運樞紐，亦為國內交通轉運頻繁發生地區，導致運輸部門高碳排；新北市、臺北市、臺中市、高雄市與臺南市的住宅碳排亦佔據前幾名，高都市發展下吸引人口遷入集居，導致住宅部門高碳排。研究發現可供未來研擬低碳策略因地制宜之差異參考。

最後，本文進而探討各縣市每人碳排放量及單位面積碳排放量作分析，分析結果發現台灣地區每人平均碳排放量以高雄市 3.78t 最高，其次為台中市 3.12t，至於其他超過台灣地區總平均的縣市包括苗栗縣、桃園縣、彰化縣、新竹縣及台南市等 7 個縣市。至於台灣各縣市單位面積碳排放量情形，本文發現台北市及高雄市兩縣市皆超過 150t/ha，顯示其都市活動所產生的碳排放量密度很高，尤其是台北市高達 168.71t，顯示出高密度碳排發展卻無平衡之綠地固碳之都市規劃，將導致都市發展程度超過自然環境得以負荷之狀態。

七、結論與建議

本文嘗試從碳平衡的觀點去探討台灣地區不同類型都市的碳排與綠地固碳效益，奠基於台灣地區 97 年經濟部能源局能源平衡表中的各部門中各項分類產業作為推估基礎，輔以 95 年工商普查中針對台灣地區各縣市工商業普查的產業之場所單位數為權重對能源作推估運算；綠地固碳量則根據 97 年都市及區域發展統計彙編中的都市發展土地與非都市發展土地作為綠地固碳量的分級依據，研究結果如下所示：

- (1) 本文分別以二種空間單元進行碳平衡分析，嘗試檢視目前各都市規劃下發展程度與環境本身調節能力，以檢視環境自我循環之生態平衡程度，考慮到不同公園綠地的植栽比例的差異性，造成固碳量的差異，因此本文採用平均值作為固碳量估算基礎，建立不同固碳量的類型，分析成果期能供後續永續性都市發展與碳平衡城市建構推動策略因地制宜之差異參考。
- (2) 以「行政轄區」為空間單元分析碳平衡結果顯

示，台灣地區西部都市為高都市發展區，多呈現高碳排之結果，惟新北市與高雄市因具備天然林高覆蓋率，是以碳平衡結果較低固碳的桃園縣、彰化縣、臺北市、台中市及台南市較佳。此外，天然林覆蓋之縣市普遍呈現高固碳效益，包括花蓮縣、南投縣等。若以「都市發展區」為空間單元分析碳平衡結果顯示，發現台灣地區縣市普遍面臨碳失衡的狀態，顯示都市綠地無法負荷都市發展所需之高碳排。

- (3) 台灣地區目前都市發展區綠地規劃是無法滿足其碳平衡之需求的，失衡最嚴重的包括高雄市、台中市、臺北市、桃園縣、新北市，超過四百萬噸，其次為彰化縣和台南市約兩百萬至三百萬噸，其他縣市則約為一百萬噸。進一步歸類高碳排放量之縣市發展類型發現，高雄市、新北市與台中市產業的高度發展與集中為高碳排主因，桃園縣、台中市與高雄市交通運輸為高碳排主因，新北市、臺北市、臺中市、高雄市與臺南市高人口集居為高碳排主因。
- (4) 本文受限於能源資料取得，乃初步利用經濟部能源局能源統計資料、97 年經濟部能源局能源平衡表內的七大部門的業別及 95 年工商普查之工業及服務部門中細行業別進行碳排推估，未來若各地區完成碳清查或將碳排列入常態統計調查，則可更精準的計算出碳排放量，以作為後續政府部門溫室氣體盤查減量的參考依據。此外，95 年國土利用調查中的綠地使用現況資料中，不僅在綠地分類中有較精確的資料，更有明確綠地所在的空間位置及詳實的面積，得作為後續研究之資料參考。
- (5) 綠地固碳效益推估部分受限於時間和人力的因素，僅依現有的研究個案作為假設的基礎，公園綠地的固碳量採綠地植栽比例作為平均值以建立不同固碳量的類型，惟現實中各種綠地植栽之固碳量是有差異的，後續研究得參酌最新的國土利用調查中的綠地使用現況資料。此外，本文主要是以綠地植栽進行碳平衡

中固碳效益之試算，都市土地中尚涵括其他重要碳庫，如土壤、濕地、水資源等，建議後續研究可廣納地球上其他重要碳庫如海洋、土壤等，應能更周延反映都市空間固碳效益，以為後續永續土地使用規劃之參考。

誌謝

本文為行政院國家科學委員會 99 年度「全球氣候變遷下低碳城市空間規劃(NSC 99-2410-H-006-086-)之研究計畫補助部份成果，特此感謝。

參考文獻

內政部建築研究所(2012)。綠建築解說與評估手冊。

引用於 2012 年 11 月 16 日，取自 <http://www.abri.gov.tw/utcPageBox/CHIMAIN.aspx?ddsPageID=CHIMCA&IdNo=1011>。

王永安，恭映璧(2002)。計算城市綠化面積的碳平衡法。生態經濟，(3)，62-63。

王安民(1999)。因應全球 CO₂ 減量背景下之永續都市規劃策略研究—以台北市為例。未出版之碩士論文。國立中興大學都市計劃研究所，台北市。

王京明，黃大薇，廖寶珠(1996)。能源密集工業能源消費研究。經濟部能源委員會研究報告。台北市：經濟部能源委員會。

王珮琪(2005)。以二氧化碳減量觀點探討都市計畫綠化管制策略。未出版之碩士論文。國立臺北科技大學建築與都市設計研究所，台北市。

行政院農業委員會林務局(2005)。森林資源調查專案成果。引用於 2011 年 6 月 1 日。取自 http://www.forest.gov.tw/lp.asp?CtNode=1582&CtUnit=86&BaseDSD=7&mp=1&xq_xCat=1。

吳俊賢，林俊成，李國忠，陳溢宏，林麗貞，林瑞進(2005)。森林能源作物之二氧化碳吸存效果與能源產出效率。臺大實驗林研究報告，19(1)，43-53。

李敏(1999)。城市綠地系統與人居環境規劃。北京：中國工業出版社。

肖慧娟，匡耀求，黃寧生，朱照孫，劉孫，唐金利(2006)。工業化高速發展時期廣州市的碳收支變化初步研究。生態環境，15(6)，1209-1215。

林孟儒(2002)。因應全球二氧化碳減量生態趨勢之都市綠化政策研究-以台北市為例。未出版之碩士論文。國立臺北科技大學建築與都市設計研究所，台北市。

林建廷(2009)。台灣地區服務業部門能源消費與 CO₂ 排放變動關聯分析。未出版之碩士論文。嘉南藥理科技大學環境工程與科學所，台南市。

林憲德(2005)。綠建築解說與評估手冊。新北市：內政部建築研究所。

林憲德(2007)。城鄉生態。台北市：詹氏書局。

郝婷婷，李順龍(2006)。黑龍江省森林碳匯潛力分析。林業經濟問題，26(6)，519-523。

高雄市政府環境保護局(2006)。高雄市溫室氣體減量策略計畫。高雄市：高雄市政府。

張穎，王群，李邊疆，王萬茂(2007)。應用碳平衡法測算生態用地需求量實證研究。中國土地科學，21(6)，23-28。

陳青洲(2006)。從生態觀點探討臺北市都市公園之規劃。未出版之碩士論文。國立臺北科技大學建築與都市設計研究所，台北市。

彭立華，陳爽，劉雲霞，王進(2007)。Citygreen 模型在南京城市綠地固碳與削減逕流效益評估中的應用。應用生態學報，18(6)，1293-1298。

馮炳勳，陳家榮(2003)。台灣水泥業因應二氧化碳排放減量策略之研究。福建環境，20(1)，16-19。

黃群達(2006)。住宅及與商業部門能源消費及二氧化碳排放特性與變動趨勢分析。未出版之碩士論文。國立成功大學環境工程研究所，台南市。

楊士弘(1996)。城市綠化樹木碳氧平衡效應研究。城市環境與城市生態，9(1)，37-39。

經濟部能源局(2008)。97 年經濟部能源局能源平衡表。引用於 2010 年 12 月 1 日，取自 http://web3.moeaboe.gov.tw/ECW/populace/web_book/WebReports.aspx?book=B_CH&menu_id=145。

- 經濟部能源局(2012)。我國燃燒二氧化碳排放統計與分析。引用於 2013 年 1 月 17 日，取自 http://web3.moeaboe.gov.tw/ECW/populace/content/wHandMenuFile.ashx?menu_id=363。
- 劉常富，趙爽，李玲，李小馬、何興元、陳璋(2008)。沈陽城市森林固碳和污染物淨化效益差異初探。《西北林學院學報》，23(4)，56-61。
- 戴天興(2002)。《城市環境生態學》。北京市：中國建材工藝出版社。
- 謝軍飛，李玉娥，李延明，高清竹(2007)。北京城市園林樹木碳貯量與固碳量研究-樹木碳貯量與固碳量研究。《中國生態農業學報》，15(3)，5-7。
- 謝漢欽，汪大雄，林俊成(2003)。應用地理資訊系統估算六龜試驗林森林蓄積變動。《台灣林業科學》，18(3)，171-182。
- 羅仁豪(2004)。《台中市綠地、廣場、廣兼停、停車場用地之綠化與保水效益研究》。未出版之碩士論文。逢甲大學建築學研究所，台中市。
- 蘇茂豐，謝楨檣，陳仁亮，蘇進興(2005)。我國產業溫室氣體盤查工作之建置-以水泥業為例。《環境工程會刊》，16(1)，24-29。
- Byrne, J., Wang, Y. D., Shen, B., Wang, C., & Kuennen, C. R. (1994). Urban sustainability in an industrializing country context: the case of China. In R. Wang (Ed.), *Urban Ecological Development : Research and Application* (pp.52-70). Beijing: China Environmental Science Press.
- Chafe, Z. (2007). Reducing natural disaster risk in cities. In Worldwatch Institute (Ed.), *State of the World 2007: An Urban Planet* (pp. 112-133). London, UK: Earthscan.
- Chiesura, A. (2004). The role of urban parks for the sustainable city. *Landscape and Urban Planning*, 68, 129-138.
- IPCC (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- IPCC (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Imhoff, M. L., Bounoua, L., DeFries, R., Lawrence, W. T., Stutzer, D., Tucker, C. J., & Ricketts, T. (2004). The consequences of urban land transformation on net primary productivity in the United States. *Remote Sensing of Environment*, 89, 434-443.
- Jo, H. K., & McPherson, E. G. (1995). Carbon storage and flux in urban residential greenspace. *Journal of Environmental Management*, 45(2), 109-133.
- Jo, H. K. (2002). Impacts of urban greenspace on offsetting carbon emissions for middle Korea. *Journal of Environmental Management*, 64(2), 115-126.
- Kirby, K. R., & Potvin, C. (2007). Variation in carbon storage among tree species: Implications for the management of a small-scale carbon sink project. *Forest Ecology and Management*, 246(2-3), 208-221.
- Maclaren, F. T., & Des, M. E. (2001). The composition of heritage authenticity in Asia's historic urban centers: The illusion of interpretation and achievement. *Urban Planning Overseas*, (4),13-17.
- McMillan, J., & Woodruff, C. (2002). The central role of entrepreneurs in transition economies. *Journal of Economic Perspectives*, 16(3), 153-170.
- Minnesota Department of Natural Resources (1991). *Carbon Dioxide Budgets in Minnesota and Recommendations on Reducing Net Emissions with Trees*. Report to the Minnesota Legislature. MN, USA: Minnesota Department of Natural Resources, Division of Forestry.
- Nijkamp, P., & Perrels, A. (1994). *Sustainable Cities in Europe*. London, UK: Earthscan.

- Nowak, D. J., & Crane, D. E. (2002). Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environmental Pollution*, 116(3), 381-389.
- Nowak, D. J. (1993). Atmospheric carbon reduction by urban trees. *Journal of Environmental Management*, 37, 207-217.
- OECD (1990). *Environmental Policies for Cities in the 1990's*. Paris, FR: OECD.
- Rees, M. (2004). *Our Final Hour: A Scientist's Warning*. NY, USA: Basic Books.
- Rowntree, R. A. (1990). Urban forestry, carbon dioxide and global climate change. *Proceedings of the 1989 Society of American Foresters National Convention, September 24-27, 1989, Spokane, Washington* (pp. 429-433). MD, USA: Society of American Foresters
- Sala, O. E., Chapin, F. S. III., Armesto, J. J., Berlow, E., Bloomfield, J., Dirzo, R., Huber-Sanwald, E., Huenneke, L. F., Jackson, R. B., Kinzig, A., Leemans, R., Lodge, D. M., Mooney, H. A., Oesterheld, M., Poff, N. L., Sykes, M. T., Walker, B. H., Walker, M., & Wall, D. H. (2000). Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, 287(5459), 1770-1774.
- Steffen, W., Sanderson, A., Tyson, P. D., Jäger, J., Matson, P. A., Moore, B. III., Oldfield, F., Richardson, K., Schellnhuber, H. J., Turner, B. L. II., & Wasson, R. J. (2004). *Global Change and the Earth System: A Planet under Pressure*. Berlin, DE: Springer-Verlag.
- Svirejeva-Hopkins, A., Schellnhuber, H. J., & Pomaz, V. L. (2004). Urbanised territories as a specific component of the Global Carbon Cycle. *Ecological Modelling*, 173(2-3), 295-312.
- Thomas, C. D., Cameron, A., Green, R. E., Bakkenes, M., Beaumont, L. J., Collingham, Y. C., Erasmus, B. F. N., Ferreira de Siqueira, M., Grainger, A., Hannah, L., Hughes, L., Huntley, B., van Jaarsveld, A. S., Midgley, G. F., Miles, L., Ortega-Huerta, M. A., Peterson, A. T., Phillips, O. L., & Williams, S. E. (2004). Extinction risk from climate change. *Nature*, 427, 145-148.
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) (2005). *Reducing Emissions from Deforestation in Developing Countries: Approaches to Stimulate Action: Draft Conclusions Proposed by the President*. FCCC/CP/2005/L.2. Geneva, Switzerland: United Nations Office. Retrieved Oct. 15, 2013 from <http://unfccc.int/resource/docs/2005/cop11/eng/102.pdf>
- UNFPA (2011). *State of World Population*. NY, USA: UNFPA.
- UN Habitat (2008). *State of the World's Cities 2008/2009—Harmonious Cities*. Nairobi, KE: United Nations Human Settlements Programme.
- Zellner, M. L., Theis, T. L., Karunanithi, A. T., Garmestani, A. S., & Cabezas, H. (2008). A new framework for urban sustainability assessments: Linking complexity, information and policy. *Computers, Environment and Urban Systems*, 32(6), 474-488.
- Zhang, L., Liu, Q., Hall, N. W., & Fu, Z. (2007). An environmental accounting framework applied to green space ecosystem planning for small towns in China as a case study. *Ecological Economics*, 60(3), 533-542.

REFERENCES in English

- Architecture and Building Research Institute (2012). *An Evaluation Manual for Green Buildings in Taiwan*. Retrieved Nov. 16, 2012 from <http://www.abri.gov.tw/utcPageBox/CHIMAIN.aspx?ddsPageID=CHIMCA&IdNo=1011>
- Bureau of Energy, Ministry of Economic Affairs (2012). *The Statistic and Analysis of CO₂ Emission in Taiwan*. Retrieved Jan. 17, 2013 from http://web3.moeaboe.gov.tw/ECW/populace/content/wHandMenuFile.ashx?menu_id=363.
- Bureau of Energy, Ministry of Economic Affairs (2008). *Energy Balance Sheet in 2008*. Retrieved Dec. 1, 2010 from

- http://web3.moeaboe.gov.tw/ECW/populace/web_book/WebReports.aspx?book=B_CH&menu_id=145.
- Byrne, J., Wang, Y. D., Shen, B., Wang, C., & Kuennen, C. R. (1994). Urban sustainability in an industrializing country context: the case of China. In R. Wang (Ed.), *Urban Ecological Development : Research and Application* (pp.52-70). Beijing: China Environmental Science Press.
- Chafe, Z. (2007). Reducing natural disaster risk in cities. In Worldwatch Institute (Ed.), *State of the World 2007: An Urban Planet* (pp. 112-133). London, UK: Earthscan.
- Chen, C. C. (2006). *An Ecological Perspective on Urban Park Planning in Taipei City*. Unpublished master's thesis. Department of Architecture & Graduate Institute of Architecture and Urban Design, National Taipei University of Technology, Taipei.
- Chiesura, A. (2004). The role of urban parks for the sustainable city. *Landscape and Urban Planning*, 68, 129-138.
- Dai, T. X. (2002). *City Environmental Ecology*. Beijing: Chinese Architectural material and artifact publishing .
- Environmental Protection Bureau, Kaohsiung City Government (2006). *GHG Reduction Strategies of Kaohsiung City*. Kaohsiung: Kaohsiung City Government.
- Feng, P. H., & Chen, C. Z. (2003). A study on the CO₂ reduction strategies in the Taiwan cement industry. *Fujian Environment*, 20(1), 16-19.
- Forestry Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan (2005). *Forest Resources Investigation Program*. Retrieved Jun. 1, 2011 from http://www.forest.gov.tw/lp.asp?CtNode=1582&CtUnit=86&BaseDSD=7&mp=1&xq_xCat=1.
- Hsieh, H. C., Wang, D. H., & Lin, J. C. (2003). Using a geographic information system to estimate changes in carbon dioxide sequestration of forest stocks in the Liukuei Experimental Forest. *Taiwan Journal of Forest Science*, 18(3), 171-182.
- Huang, C. T. (2006). *Trends and Characteristics Analysis of Energy Consumption and CO₂ Emission in Residential and Commercial Sectors*. Unpublished master's thesis. Department of Environmental Engineering, National Cheng Kung University, Tainan.
- IPCC (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- IPCC (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Imhoff, M. L., Bounoua, L., DeFries, R., Lawrence, W. T., Stutzer, D., Tucker, C. J., & Ricketts, T. (2004). The consequences of urban land transformation on net primary productivity in the United States. *Remote Sensing of Environment*, 89, 434-443.
- Jo, H. K., & McPherson, E. G. (1995). Carbon storage and flux in urban residential greenspace. *Journal of Environmental Management*, 45(2), 109-133.
- Jo, H. K. (2002). Impacts of urban greenspace on offsetting carbon emissions for middle Korea. *Journal of Environmental Management*, 64(2), 115-126.
- Kirby, K. R., & Potvin, C. (2007). Variation in carbon storage among tree species: Implications for the management of a small-scale carbon sink project. *Forest Ecology and Management*, 246(2-3), 208-221.
- Lee, M. (1999). *City Green System and Living Environment Planning*. Beijing: China Industry Press.
- Lin, J. T. (2009). *Relational Analysis between Energy*

- Consumption and CO₂ Emission Variation of Service Sector in Taiwan*. Unpublished master's thesis. Department of Environmental Engineering and Science, Chia Nan University of Pharmacy and Science, Tainan.
- Lin, H. T. (2005). *Green Building Introduction and Evaluation Handbook*. New Taipei City: Architecture and Building Research Institute, Ministry of the Interior.
- Lin, H. T. (2007). *Biodiversity Design for Living Environment*. Taipei: Chan's Arch-Publishing Co.
- Lin, M. R. (2002). *A Research on Urban Greening Policy in the Trend of Ecology for Reducing Globally CO₂ Emission -A Case Study of Taipei*. Unpublished master's thesis. Department of Architecture & Graduate Institute of Architecture and Urban Design, National Taipei University of Technology, Taipei.
- Liu, C. F., Zhao, S., Li, L., Li, X. M., He, X. Y., & Chen, W. (2008). Difference analysis of carbon fixation and pollution removal of urban forest in Shenyang. *Journal of Northwest Forestry University*, 23(4), 56-61.
- Lo, J. H. (2004). *Research on the Benefits of "Greening" and "Raining Storage" on Green Lands, Plazas, Parking-plazas and Parking Lots in Taichung City*. Unpublished master's thesis. Department of Architecture, Feng Chia University, Taichung.
- Maclaren, F. T., & Des, M. E. (2001). The composition of heritage authenticity in Asia's historic urban centers: The illusion of interpretation and achievement. *Urban Planning Overseas*, (4),13-17.
- McMillan, J., & Woodruff, C. (2002). The central role of entrepreneurs in transition economies. *Journal of Economic Perspectives*, 16(3), 153-170.
- Minnesota Department of Natural Resources (1991). *Carbon Dioxide Budgets in Minnesota and Recommendations on Reducing Net Emissions with Trees*. Report to the Minnesota Legislature. MN, USA: Minnesota Department of Natural Resources, Division of Forestry.
- Nijkamp, P., & Perrels, A. (1994). *Sustainable Cities in Europe*. London, UK: Earthscan.
- Nowak, D. J., & Crane, D. E. (2002). Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environmental Pollution*, 116(3), 381-389.
- Nowak, D. J. (1993). Atmospheric carbon reduction by urban trees. *Journal of Environmental Management*, 37, 207-217.
- OECD (1990). *Environmental Policies for Cities in the 1990's*. Paris, FR: OECD.
- Peng, L. H, Chen, S., Liu, Y. X., & Wang, J. (2007). Application of Citygreen model in benefit assessment of Nanjing urban greenbelt in carbon fixation and runoff reduction. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 18(6), 1293-1298.
- Rees, M. (2004). *Our Final Hour: A Scientist's Warning*. NY, USA: Basic Books.
- Rowntree, R. A. (1990). Urban forestry, carbon dioxide and global climate change. *Proceedings of the 1989 Society of American Foresters National Convention, September 24-27, 1989, Spokane, Washington* (pp. 429-433). MD, USA: Society of American Foresters
- Sala, O. E., Chapin, F. S. III., Armesto, J. J., Berlow, E., Bloomfield, J., Dirzo, R., Huber-Sanwald, E., Huenneke, L. F., Jackson, R. B., Kinzig, A., Leemans, R., Lodge, D. M., Mooney, H. A., Oesterheld, M., Poff, N. L., Sykes, M. T., Walker, B. H., Walker, M., & Wall, D. H. (2000). Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, 287(5459), 1770-1774.
- Steffen, W., Sanderson, A., Tyson, P. D., Jäger, J., Matson, P. A., Moore, B. III., Oldfield, F., Richardson, K., Schellnhuber, H. J., Turner, B. L. II., & Wasson, R. J. (2004). *Global Change and the Earth System: A Planet under Pressure*. Berlin, DE: Springer-Verlag.

- Su, M. F., Hsieh, C. C., Chen, T. L., & Su, C. S. (2005). The establishment of industrial GHGs investigation work- A case study of cement industry. *Journal of Engineering Environment*, 16(1), 24-29.
- Svirejeva-Hopkins, A., Schellnhuber, H. J., & Pomaz, V. L. (2004). Urbanised territories as a specific component of the Global Carbon Cycle. *Ecological Modelling*, 173(2-3), 295-312.
- Thomas, C. D., Cameron, A., Green, R. E., Bakkenes, M., Beaumont, L. J., Collingham, Y. C., Erasmus, B. F. N., Ferreira de Siqueira, M., Grainger, A., Hannah, L., Hughes, L., Huntley, B., van Jaarsveld, A. S., Midgley, G. F., Miles, L., Ortega-Huerta, M. A., Peterson, A. T., Phillips, O. L., & Williams, S. E. (2004). Extinction risk from climate change. *Nature*, 427, 145-148.
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) (2005). *Reducing Emissions from Deforestation in Developing Countries: Approaches to Stimulate Action: Draft Conclusions Proposed by the President*. FCCC/CP/2005/L.2. Geneva, Switzerland: United Nations Office. Retrieved Oct. 15, 2013 from <http://unfccc.int/resource/docs/2005/cop11/eng/102.pdf>.
- UNFPA (2011). *State of World Population*. NY, USA: UNFPA.
- UN Habitat (2008). *State of the World's Cities 2008/2009—Harmonious Cities*. Nairobi, KE: United Nations Human Settlements Programme.
- Wang, P. C. (2005). *A Study on Greening Guideline of Urban Planning by the View of CO₂ Emission*. Unpublished master's thesis. Department of Architecture & Graduate Institute of Architecture and Urban Design, National Taipei University of Technology, Taipei.
- Wang, Y. A., & Kung, Y. B. (2002). A carbonyl-equilibrium method for calculating afforestation area of cities. *Ecological Economy*, (3), 62-63.
- Wang, A. M. (1999). *Sustainable Urban Planning Strategies for Reducing CO₂ Emission—A Case Study of Taipei*. Unpublished master's thesis. Department of Urban planning, National Chung Hsing University, Taipei.
- Wang, C. M., Huang, D. W., & Liao, B. C. (1996). *Energy Consumption in Energy Dense Industries*. Report of Bureau of Energy, Ministry of Economic Affairs. Taipei: Bureau of Energy, Ministry of Economic Affairs.
- Wu, C. S., Lin, J. C., Lee, K. J., Chen, Y. H., Lin, L. C., & Lin, L. C. (2005). The effect of carbon sequestration and energy production efficiency for forest energy crops in Taiwan. *Journal of the Experimental Forest of National Taiwan University*, 19(1), 43-53.
- Xi, T. T., & Li, S. L. (2006). Analysis of forestry carbon mitigation potential in Heilongjiang Province. *Problems of Forestry Economics*, 26(6), 519-523.
- Xiao, H. J., Kuang, Y. Q., Huang, N. S., Zhu, Z. Y., Liu, Y., & Tang, J. L. (2006). Variation of the carbon budget in Guangzhou during its rapid industrialization course. *Ecology and Environment*, 15(6), 1209-1215.
- Xie, J. F., Li, Y. E., Li, Y. M., & Gao, Q. Z. (2007). Calculation of carbon storage and sequestration in the urban trees of Beijing. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 15(3), 5-7.
- Yang, S. H. (1996). Primary study on effect of C-O balance of afforestation trees in cities. *Urban Environment & Urban Ecology*, 9(1), 37-39.
- Zellner, M. L., Theis, T. L., Karunanithi, A. T., Garmestani, A. S., & Cabezas, H. (2008). A new framework for urban sustainability assessments: Linking complexity, information and policy. *Computers, Environment and Urban Systems*, 32(6), 474-488.
- Zhang, L., Liu, Q., Hall, N. W., & Fu, Z. (2007). An

environmental accounting framework applied to green space ecosystem planning for small towns in China as a case study. *Ecological Economics*, 60(3), 533-542.

Zhang, Y., Wang, Q., Li, B. J., & Wang, W. M. (2007). Study on forecasting ecological land demand with carbon-oxygen balance method. *China Land Science*, 21(6), 23-28.

註釋

¹ $0.5(\text{kg}/\text{m}^2) \times 10,000(\text{m}^2) = 5(\text{t}/\text{ha})$

² $(80\%(\text{綠覆率}) \times 70\%(\text{喬木比例}) \times 15(\text{kg}/\text{m}^2) + 80\%(\text{綠覆率}) \times 30\%(\text{灌木比例}) \times 7.5(\text{kg}/\text{m}^2)) \times 10,000(\text{m}^2) \cong 100(\text{t}/\text{ha})$

³ $100(\text{t}/\text{ha}) \times 40\% \cong 40(\text{t}/\text{ha})$

⁴ $80\%(\text{綠覆率}) \times 22.5(\text{kg}/\text{m}^2) \times 10,000(\text{m}^2) = 180(\text{t}/\text{ha})$

⁵ $80\%(\text{綠覆率}) \times 15(\text{kg}/\text{m}^2) \times 10,000(\text{m}^2) = 120(\text{t}/\text{ha})$

⁶ $(60\%(\text{綠覆率}) \times 30\%(\text{喬木比例}) \times 15(\text{kg}/\text{m}^2) + 60\%(\text{綠覆率}) \times 30\%(\text{灌木比例}) \times 7.5(\text{kg}/\text{m}^2) + 60\%(\text{綠覆率}) \times 40\%(\text{草坪比例}) \times 0.5(\text{kg}/\text{m}^2)) \times 10,000(\text{m}^2) \cong 40(\text{t}/\text{ha})$

⁷ $(80\%(\text{綠覆率}) \times 35\%(\text{喬木比例}) \times 15(\text{kg}/\text{m}^2) + 80\%(\text{綠覆率}) \times 35\%(\text{灌木比例}) \times 7.5(\text{kg}/\text{m}^2) + 80\%(\text{綠覆率}) \times 30\%(\text{草坪比例}) \times 0.5(\text{kg}/\text{m}^2)) \times 10,000(\text{m}^2) \cong 60(\text{t}/\text{ha})$

⁸ $(50\%(\text{綠覆率}) \times 30\%(\text{喬木比例}) \times 15(\text{kg}/\text{m}^2) + 50\%(\text{綠覆率}) \times 30\%(\text{灌木比例}) \times 7.5(\text{kg}/\text{m}^2) + 50\%(\text{綠覆率}) \times 40\%(\text{草坪比例}) \times 0.5(\text{kg}/\text{m}^2)) \times 10,000(\text{m}^2) \cong 35(\text{t}/\text{ha})$

⁹ $(30\%(\text{綠覆率}) \times 50\%(\text{喬木比例}) \times 15(\text{kg}/\text{m}^2) + 30\%(\text{綠覆率}) \times 50\%(\text{灌木比例}) \times 7.5(\text{kg}/\text{m}^2) + 30\%(\text{綠覆率}) \times 50\%(\text{草坪比例}) \times 0.5(\text{kg}/\text{m}^2)) \times 10,000(\text{m}^2) \cong 35(\text{t}/\text{ha})$