

台灣區域容受力及生態足跡之研究

李永展* 董娟鳴** 林士堅***

關鍵字：氣候變遷，容受力，生態足跡，碳足跡

摘要

台灣位處西太平洋颱風侵襲密集地區，島內七成以上土地屬於山坡地與高山林地，大部分人口則以高密度型態聚集於 25% 左右的平原地區，自然環境資源貧乏，且環境與地質條件敏感脆弱，配以四面環海的島嶼特性，造成台灣國土利用與山、河、海爭地，以及面對氣候變遷衝擊的高脆弱與敏感性。因此，考量有限土地資源下，台灣如何積極面對未來國土保育與經濟發展的平衡發展，有效運用區域間資源，緩解資源不足並達區域公平發展，則進行區域環境容受力的盤點，是極為重要的關鍵議題。

由於過去容受力相關研究欠缺從檢視整體環境體系土地可供給及消耗量之資源量，以檢討消費差異性及發展課題。故本研究以台灣整體發展為考量，藉由檢視「土地資源」、「糧食資源」及「碳排放」角度切入容受力研析（資源供給面），以各項資源可涵養人口規模分析，來檢視區域間發展現況及未來需求，分析區域間各項資源的承載能力，並對照生態足跡（資源需求面）之評估，以作為區域調適課題之檢視。期以注入創新思維與方法，緩解資源不足及氣候變遷之壓力，尋求台灣邁向永續發展之新契機。

The Study on Regional Carrying Capacity and Ecological Footprint of Taiwan

Yung-Jaan Lee* Chuan-Ming Tung** Shih-Chien Lin***

KEYWORDS: Climate Change, Carrying Capacity, Ecological Footprint, Carbon Footprint

ABSTRACT

Taiwan is located in the Western Pacific where typhoons frequently strike. Over 73% of the land is hillsides and alpine forests, and most of the population cluster densely in the 25% plain land. The environment and geological conditions are sensitive and vulnerable. In recent years, due to the rapid socio-economic growth, pressure has increased on land development. Together with island characteristics of being surrounded by the sea, it has caused frequent conflicts for mountain, river, and sea areas when it comes to Taiwan's land use. In recent years, due to the increasing climate change impacts, how to maintain a stable equilibrium in the ecosystem and ensure people's survival and the nation's sustainable development, have become important key issues that must be actively faced, in response to climate change impacts and taking into consideration land and resource limitations.

Related studies on carrying capacities in the past focused on environmental carrying capacity, recreational carrying capacity, and urban carrying capacity, which mainly explored the population limit that a single environmental system can carry or the actual degree of development. There is no careful examination on how much the land can supply in the overall environment system and the amount of resources for the amount of consumption that explores the issues of consumption differences and development. This study takes Taiwan's overall development into consideration, and analyzes carrying capacity (resource supply side) from the perspective of "land resources", "food resources", and "carbon emissions". This study analyzes the population size that can be covered by each resource to show the current situation of development between regions and future demands, the carrying capacity of each resource between each region, and compares it with ecological footprint (resource demand side), to serve as views for regional adaptation topics of discussion. This study attempts to inject innovative thinking and methods to ease resource shortage and climate change pressures, in order to seek new opportunities for Taiwan's progress toward sustainable development.

收件日期：2017.01.24；接受日期：2017.10.23

*中華經濟研究院研究員／教授(通訊作者 Email：yungjaanlee@gmail.com)

Research Fellow/Professor, Chung-Hua Institution for Economic Research, Taiwan

**銘傳大學都市規劃與防災學系副教授

Associate Professor, Department of Urban Planning and Disaster Prevention, Ming Chuan University, Taiwan

***中華科技大學建築系講師

Lecturer, Department of Architecture, China University of Science and Technology, Taiwan

DOI:10.3966/101632122017120102003

一、前言

台灣因地理位置及環境影響，島內地形地勢陡峻，山坡地與高山林地遍布，地質條件脆弱。在面臨經濟全球化及氣候變遷（全球暖化）「雙重暴露」的情況下（Kelman, et al., 2015; Silva, et al., 2010），當颱風、地震等災害來臨後引發嚴重的國土破壞、土壤流失與生態環境劣化問題，使原本脆弱的地質條件更受到嚴重衝擊，可使用之土地範圍更加緊縮。而近年來氣候變遷相關研究指出，目前全球均溫相較前工業時代已高於 4°C，並可能最快於 2060 年時更加劇（Betts, et al., 2011）。暖化的氣候可能使 2016 年的溫度比前工業時代增加 1°C，造成近代史上人數最多的 6,000 萬人必須被迫遷移（World Economic Forum, 2016）。IPCC 於 2014 年 11 月的最新報告再次確認氣候系統的暖化是「明確的」（unequivocal），而人類的影響「非常可能」（extremely likely）是主要的原因（IPCC, 2014）。

此外，世界銀行 2015 年度報告也指出，氣候變遷是人類及地球最基本的威脅，必須妥善處理，否則無法實現消除極端貧窮的目標（World Bank, 2015），而氣候變遷減緩及調適的挫敗則被認為是未來最具衝擊影響的風險（World Economic Forum, 2016）。此外，生態惡化地區往往會持續貧窮，根據世界銀行的研究，風險加劇使各種污染每年大約奪取 900 萬人的生命（World Bank, 2015）。

另一方面，在全球化的趨勢下，國家間的空間距離逐漸變小，經濟發展、政策制度及社會網絡間的交集使各國獲得越來越多的發展潛力，但也可能造成環境壓力及災害風險。UN-Habitat (2011) 的報告指出，2007 年全球的都市人口首次超過了鄉村人口，1950 年超過 70% 的全球人口住在鄉村地區及低於 30% 居住在都市地區，但到了 2014 年，全球已有 54% 的人口居住在都市地區。都市人口預期會持續成長，預估到 2050 年，全球僅有 34% 的人口居住在鄉村，而有 66% 的人口居住在都市。根據 UNEP (2011) 的報告，發展中國家都市中的人口有 30-50% 居住在環境脆弱地區，這些地區的環境風險包括淹水、氣候威脅、住宅缺乏

及基礎設施貧瘠等。

而已發展國家的過度消費（overshoot）則造成了生態浩劫及環境破壞，Brown (2011) 便指出，為了維持人類目前的消費水準，我們需要 1.5 個地球。舉例而言，能源及自然資本的不永續過度消費所造成的「生態足跡」（ecological footprint）超過地球生物容量（biocapacity）將近一半（UNISDR, 2015）。生態足跡概念源自 Wackernagel & Rees (1996)，其計算內涵為以生物生產力土地估算特定人口或經濟體的資源消費與廢棄物吸收之面積；此方法可估算人類消耗的資源，必須要從另外一個或數個生態系中提供多大的土地面積來對人類消費的資源或廢棄物進行分解，因此生態足跡是計算人類對地球資源消費的重要計算方式（GFN, 2013; Lee, 2015; Lee & Peng, 2014; Wackernagel, 2014）。生態足跡主要是由耕地足跡、牧草地足跡、森林足跡、漁場足跡、碳足跡及建成地等六大項加總而成，其中耕地足跡、碳足跡及建成地之計算成果，亟適合與台灣容受力進行比對，檢視在目前人口規模下，糧食資源、碳排放與居住土地的供需狀況差異，以了解台灣人口之消費需求，與居住土地所對應之各項資源可涵養人口規模間的差異。

台灣屬於四面環海的島國，面對氣候變遷的衝擊勢必更嚴峻，除了積極的減緩作為外，還需搭配調適作為，才可能將氣候變遷的衝擊及危機減至最低，促使環境、社會及經濟朝向永續發展之方向。因此，為因應氣候變遷衝擊以及考量土地與資源有限的條件下，我們更需積極面對台灣各區域未來國土保育與經濟發展的平衡發展，必需從國土規劃著手，在環境可承載的範圍內追求經濟發展，對人口密度與資源分佈進行引導與控制，並協調區域間如何發展及如何有效運用調度區域間資源，以達區域公平發展且緩解資源不足之窘境，才能邁向永續發展之目標。

台灣地狹人稠、資源分布不均，且不論都市與非都市皆有過度開發的情況，在未考量環境容受力狀況下開發，已導致國土空間秩序失衡，使土地資源受到相當程度的破壞、環境接連發生災害，導致土地的高度脆弱。面對未來不可測的氣候災難對於台灣環境與

社會造成的可能衝擊，實應從台灣在環境供給與居民需求的角度，對於國土在各區域的供給現況，以及因應人民消費的需求現況進行檢視與檢討，以在極端氣候之狀態下，從國土與區域角度，找出因應對策。然而過去容受力相關研究，多著重於探討單一環境體系所能承受之人口極限，或實質可開發程度，欠缺對整體環境體系土地可供給及消耗之資源量加以檢視，也欠缺對區域人口在各項資源消費量上進行檢討，以致無法瞭解區域差異性及區域發展面臨之不同問題；此外今年即將實施的國土計畫法，除了法制化地進行國土計畫總量控管外，亦將對國土空間計畫體系進行前所未有的變革，在全國性之國土計畫下，直接擬定縣市層級的國土計畫；然而若考量在韌性城鄉之架構下之地區容受力，各項資源的需求與環境供給上，仍應以在地區域或就近區域供給為重要考量(如糧食、碳(能源)、居住容受力等)，以作區域性環境容受程度與並可以此作為縣市層級國土計畫在擬定時，在區域整體用地考量上之戰略性思維。

有鑑於此，本研究以台灣整體發展為考量，藉由檢視土地資源、糧食資源及碳排放角度切入容受力研析(資源供給面)，以各項資源可涵養人口規模分析，檢視區域間發展現況及未來需求，分析區域間各項資源的承載能力。此外，本研究並以生態足跡為資源需求面之考量方式，以生態足跡中的建成地足跡、糧食足跡與碳足跡之計算式，對照台灣各區域人口生態足跡中，有關建成地足跡、糧食足跡、碳足跡等之現況，對台灣與各區域之供需差進行分析，了解各區域在居住、糧食與碳排放等之現況課題，並擬定合適之因應調適策略；期以注入創新思維與方法，以緩解資源不足及氣候變遷之壓力，尋求台灣在地邁向永續發展之新契機。

二、文獻回顧

根據 UNEP (2011) 的報告，發展中國家都市中的人口有 30-50% 居住在環境脆弱地區，這些地區的環境風險包括淹水、氣候威脅、住宅缺乏及基礎設施貧瘠等。而都市人口食物消耗亦逐年增加，從 1992 年至

2007 年，魚類及海鮮類消耗量增加 32%、肉類消耗量增加 26%，都市成為日趨龐大的消費體。

全球化不只帶來都市化，也導致經濟、社會及環境等議題，例如所得分配不均、住宅供需失衡、犯罪率增加、空氣品質低落等。都市化將風險集中至城市地區，使這些地區助長了根本的環境變遷原因(如溫室氣體排放等)，也在面對極端氣候的衝擊及壓力時也變得更脆弱。都市人口消耗 75% 的能源 (United Nations, 2009)、製造 80% 的碳排放量 (World Bank, 2010)。人口過度集中在同一地區，產生了「巨型都市」(Megacities)，過度密集的人口結構及產生的衛生、廢棄物管理、空氣品質及居住議題，成為未來各界亟須面對的挑戰。

根據聯合國「政府間氣候變遷專門委員會」(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 2014 年發表之「第五次氣候評估報告 (Assessment Fifth Climate Report, AR5)」，科學家比過去更確信全球暖化為人類活動所造成，自 1750 年來，人類活動已導致大氣中的二氧化碳溫室氣體的濃度上升 (IPCC, 2014)。依據國際能源總署 (OECD/IEA) 2015 年統計資料及環保署統計資料顯示，台灣於 2013 年二氧化碳排放總量為 267.7 百萬公噸 (環境保護署, 2015; OECD/IEA, 2015)，占全球排放總量的 0.77%，並排名全球第 23 位，若對照台灣總人口可知，台灣是排碳大國。因此，台灣國土中有多少的碳容受力，以吸附製造的二氧化碳數量，則是一重要的議題；而在陸地生態系中，森林應為重要的吸附二氧化碳資源，每年約可吸存 18.5 億公噸的二氧化碳，在減緩碳排放上具有不可替代的地位和作用 (李國忠, 2005)，森林可確保生態系服務 (ecosystem services)，例如提供財貨的原始材料、調節地方及全球氣候、緩衝氣候事件、調節水文循環及保護集水區等 (Martire, et al., 2015)。至於在減緩碳排放量資源方面，森林也是重要的減緩碳排放資源，台灣目前林地面積為台灣地區可吸附二氧化碳的主要資源，故目前林地面積可吸附二氧化碳數量，亦為本研究欲分析的重點之一。

此外，糧食安全風險非常大的原因，係來自於全

球人口成長與中產階級人口對糧食需求的大幅增加，而變異的氣候將使農業生產更加受限（World Economic Forum, 2016）。根據聯合國糧食及農業組織（Food and Agriculture Organization, FAO）2015 年報告，2050 年時全球發展中國家都市地區人口之淨成長，都市地區將面臨水及食物的高度需求。該報告也指出幾項因都市化而可能造成的問題，如大都市地區人口密集且高密度發展下，大部分人口居住於極小的空間中。多數發展中國家快速成長的都市中，高達 60% 的都市將面臨天然災害衝擊之高度風險；前述狀況均驗證了都市高度發展之趨勢，形成了對自然資源強大需求的消費與對土地資源容受力的高度負載，此趨勢在面臨極端氣候的挑戰下，更不利於環境與人類的永續發展。因此，要控制無止境對資源的消費需求，同時了解土地資源容受力（環境資源供給）與生態足跡（人類消費需求）將是重要的參考依據。

所謂土地資源容受力，為特定地區土地所能持續供養的人口數量，即土地資源人口承載量，以探討人口消費與食物生產、人類需求與資源供給之間的平衡關係問題（封志明等，2008）。由於環境容受力具不可回復性，在自然環境的限制及環境超限使用之情況下，空間調適策略成為首要考量，綜合上述容受力的分類，容受力可著力之議題為人類系統及生物生態系統等之永續發展；討論範圍囊括物種數量、資源供需平衡至環境永續發展；在空間治理上，由固定範圍之最大最適量至跨空間資源流動調配及交換影響。綜合上述原因，本研究將以吸收二氧化碳之資源（林地）、糧食及居住面積資源作為分析重點，分別計算其容受力與生態足跡，以了解台灣現況下可供給的資源，以及現有人口對資源之需求，是否造成供需失衡之狀態，而在面對氣候變遷的狀態下，如何針對前述供需差異與其所產生的課題擬定相對應的調適策略。

2.1 容受力文獻

某個環境的生物品種容受力是指在食物、棲地、水及其他維生必需品可取得的條件下，該環境可持續維持的最大物種數，而以人口生物學角度而言，容受

力可定義為環境的最大負荷量（Hui, 2006）。容受力概念為監控永續發展之工具，此概念源自於生態環境，在生態領域為「容納量」，定義為「一生態環境所能容納某一生物物種的最大量」；在工程領域中解釋為「承載力」，指「土層或岩盤能承載結構物所加之荷重」；在遊憩資源的管理上為「承載量」，指「遊憩區（遊憩資源）能夠長期維持遊憩品質的使用量」；在都市規劃領域，為「容受力」（黃書禮，2000）。

Odum (1971) 將容受力定義為「生態環境所能持續支持某一種生物品種之最大族群數量」。Nieswand & Pizor (1977) 將容受力定義為「一地區在不遭受不可回復的破壞下，所能維持的活動量」；黃書禮（1987）則認為容受力係指在不危及環境體系的前提下，一個都市或區域所能容納的人口成長量與都市發展程度。廣義之容受力概念應包括生態系之回復力、穩定性、同化力以及承受外界作用之敏感性。而李永展（1996）則認為「在未永久減損某個集居地人口維持生態系統的生產力下，該集居地所能永久支持的最大人口數」便是容受力。

Wackernagel & Rees (1996) 從環境面及資源面將容受力的解釋為在不減少適當的生態系統功能的完整性及多樣性下，維持最大資源消費率及最小廢棄物排放率，且容受力的分析應同時考量資源供給面與人類需求行為之互動關係。更進一步地，Rees (2000) 將容受力的定義為「在不減少適當的生態系統功能的完整性及多樣性下，維持最大資源消費率及最小廢棄物排放率」。易言之，特定區域之經濟規模（總資源消耗量），應不超過該區域之容受力的總量，以避免加速自然資源的消耗（Daly, 1990）。

容受力的並非全以資源的供給面來考量可承受之人口數量，必須納入可淨化生產與消耗過程時所產生的廢棄物彼此間相關所需資源之容量；而探討人與環境的複合系統時，容受力的應包含天然資源系統、人為活動系統及都市發展（Godschalk & Axler, 1977）。

容受力的為環境體系在不受嚴重破壞之條件下，所能承受之人口極限，或實質可開發程度（Schenider, et al., 1978）；Ortolano (1984) 將容受力的定義為維持環境品

質及公共福利於社會所能接受時所對應的最大成長上限。而容受力是一種動態變化並非固定不變的狀態，會隨著生活型態、科技發展及實質設施之可利用性的變動而改變 (Nieswand & Pizor, 1997)。一般而言，都市之永續發展建立在人口、經濟發展、自然資源、生態環境的均衡成長，當人口或產業過度成長時將影響到當地的環境容受力 (Gilbert & Braat, 1991)。

人類承載能力可定義為世界在毫無「自然、文化及社會環境」受損下可支持的人口大小，(Abernethy, 2001)。而人類活動發展不應該超過區域的容受力，容受力取決於區域韌性的大小。若人口及人類活動超過了容受力的極限值，將發生更為惡化的負面衝擊 (Graymore, et al., 2010)。另一方面，在動態的容受力概念上，科技雖然有時可正面扮演重要角色，但有時其影響可能會造成問題 (Martire, et al., 2015)。過去在探討容受力多以土地可承載之人口量評析容受力大小，本研究將上述概念運用於人類資源中，分析人類生活之土地可提供之最大資源量，然後與資源消耗量相互比對，期能研擬出更妥適的居住環境及因應策略。

2.2 生態足跡

在永續發展的思潮下，Wackernagel & Rees (1996) 將生態經濟學為基礎的容受力分析，轉換成較容易理解的生態足跡概念。生態足跡與 1960 年代所提出的環境容受力之分析觀點有所不同，容受力是表示一區域或都市在發展不危害其生態體系的情況下，所能容納的最大人口容量。永續國土利用應使土地容受力受正確控制，因工業化之影響，使得都市生態系統須於有限土地上，承載大量甚至超量生產消費活動，而線性新陳代謝的廢棄物輸出方式，更造成資源無法循環，減少土地容受力，都市亦被迫必須承受另一個人造生態系統，成為生態黑洞，因此，進行國土資源規劃開發時，應確切考量土地容受負荷，並於有限土地資源中評估最適合當地的環境資源生態系統 (李永展等，2015)。

生態足跡為以生物生產力土地估算特定人口或經濟體的資源消費與廢棄物吸收之面積；亦即只要有任

何物質或資源被消耗，就必須要從另外一個或數個生態系中提供一些土地，這些土地負責提供與這些消費有關的資源或廢棄物分解的功能 (Wackernagel & Rees, 1996)。此即代表生態足跡的大小與環境衝擊成正比，足跡越大，環境衝擊也越大；而足跡的大小與每人可使用的生物生產力土地面積成反比，足跡越大，每人可使用的生物生產力土地面積也就越小 (李永展，2005)。

國內生態足跡研究最早為李永展、陳安琪於 1997 年參考 Wackernagel & Rees (1996) 的研究，將生態性土地生產力分為六個類別，分別為化石能源地、耕地、林地、牧草地、建成地及海洋，試圖以列舉式計算方式進行生態足跡之估算。而由於該研究並未納入「等值因子」(equivalence factor) 進行計算矯正，因而計算出來的生態足跡與現況有所落差。2003 年「全球足跡網絡」(Global Footprint Network, GFN) 建置全球足跡資料庫，讓人們瞭解自然的容受力及使用量、如何使用、被誰使用等，並設立足跡帳戶使人們得知個人使用自然資源的容量。2005 年農委會報告中回溯自 1994 年並推到 2003 年，以 10 年時間為基期，透過台灣統計資料的蒐集與測量建構台灣生態足跡的統計資料庫，並將等值因子納入研究分析的過程，以檢視台灣 1994-2003 年間生態足跡的發展趨勢。2006 年後續研究則首次突顯了二氧化碳排放所造成的壓力，並同時進一步估算縣市層級的生態足跡，藉由生態足跡乃估算人類消費所挪用之資源土地大小的觀點，透過各縣市之於全國家庭消費支出的比例，進行各縣市生態足跡的估算，其研究結果得知消費型態和區域特性與生態足跡密切相關 (李永展，2005)。

而進一步比較足跡組成，亦可得知完善的公共服務與有效的土地利用亦為縮小足跡規模的重要路徑 (李永展，2005)。Lee & Peng (2014) 參考了 GFN 於 2011 年出版的國家足跡帳戶 (National Footprint Account, NFA)，進行台灣 2008-2011 的生態足跡的估算，該年期趨勢已超過 1997-2007 年生態足跡，為因應此發展趨勢，勢必須加強碳排放及節能減碳政策，並有效管理台灣的生態資源。Mancini et al. (2015) 則

指出平均森林碳吸存 (Average Forest Carbon Sequestration, AFCs) 為碳足跡的關鍵參數，這也是首次將森林野火、土壤、採伐木材產品的碳排放納入計算，正式將森林碳吸存視為是探討環境提供人類消費時吸收碳排放的計算方式。

綜上所述，容受力與生態足跡為相反的概念，容受力為估算土地可承受人口及開發活動之能力，係在衡量每單位土地面積可養活的人口數，而生態足跡則衡量為了養活每個人所需消耗的土地(或水域)面積，其概念如圖一所示。容受力分析可顯示生態環境所能提供的資源，為供給面；而生態足跡分析可顯示個人消費了多少土地資源，為需求面。由於過去國內外相關文獻中，並無同時檢視某特定區域內容受力及生態足跡之相關研究；為探討台灣不同區域人為活動是否已逼近自然的極限，或總負荷是否持續保持在容受力之內，本研究檢視資源供需關係，容受力提供台灣各區域土地可提供支持人類活動之供給量，生態足跡則提供為了維持人類生存及社會運作所需消耗的資源，如此將有助於本研究探討台灣各區域是否存在過度消費的情況，也達到監控邁向永續性目標的進程。

三、研究方法

本研究針對北、中、南、東四個區域進行國土容受力及生態足跡分析，探討台灣現有資源、環境、經濟等供需是否平衡，並研擬未來各區域空間調適策略。建構在灰色文獻 (Gray literature; Schöpfel & Farace,

2010)(國土空間策略規劃、全國區域計畫、縣市相關計畫等)分析的基礎上，本研究於 2014 年 12 月至 2015 年 5 月經過多次專家學者深度訪談，並分別於北中南三區，邀集專家學者與各層級政府代表，針對台灣區域容受力之分析方式與調適策略進行座談會，共計 12 名專家學者及 30 名政府代表參與；會中專家學者及各與會代表，分別針對本研究在容受力與生態足跡之計算公式之合理性，以及容受力與生態足跡公式下，所需要之政府相關統計資料進行檢視與討論，以修正容受力與生態足跡公式，及其下具合理性之統計資料項目；此外，本研究於 2015 年 1 月 16 日舉辦國土容受力與韌性城鄉圓桌論壇，邀請美國紐約大學的 Peter Marcotullio 教授與香港中文大學的伍美琴教授，分享紐約與香港的案例，並針對區域容受力、生態足跡的計算方式、計算因子進行討論與交流，並依照多次討論結果修正台灣各區域容受力、生態足跡及調適策略結果，修正後之結果詳見表 2。

本研究將「國土容受力」定義為「由自然資源供給及人類需求角度出發，探討國土所能承載的人口規模」，從居住、糧食及林地三大資源的角度切入，國土容受力細分為「生產用」與「生活用」兩類型之土地。本研究並分析全國各區域資源消耗，以提供調適策略研擬之依據。上述各項評估方式說明如表一，藉由表中計算因子作為後續分析比較之依據 (李永展等，2015)。

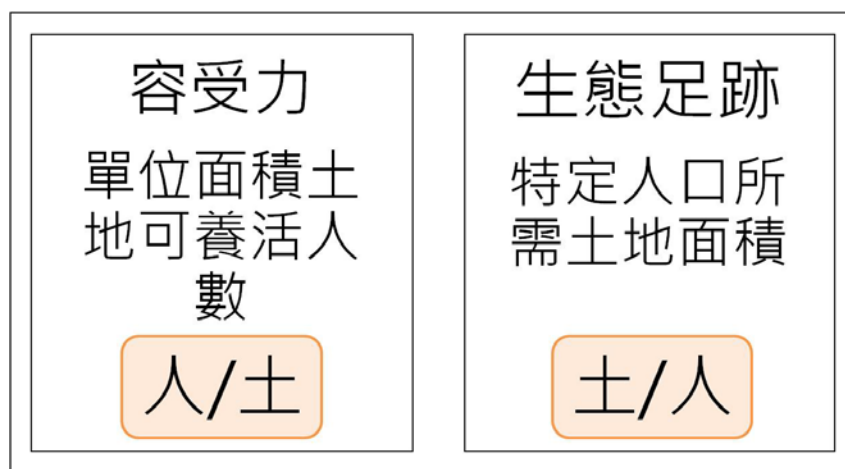


圖 1 容受力與生態足跡概念圖

表 1 國土容受力及生態足跡評估方式

類別	計算概念/單位	資料來源
土地容受力	1. 種植面積計算可承載之人口數	2012 年農業統計年報
	2. 耕地面積計算可承載之人口數	
	3. 農業使用土地－農作面積計算可承載之人口數	
【公式】可承載人口數(人) = 單位面積可承載人口數(人/公頃) × 種植(或耕地)面積(公頃)		
土地容受力	居住使用土地的發展狀況，從計畫面推估可承載人口數	2012 年營建統計年報
	都市計畫推估：未來可居住人口數 = (住宅區面積 × 120% + 商業區面積 × 180%) ÷ 平均每人居住面積(以通盤檢討實施辦法中對住宅用地估算方式，即 50m ² /人計算)	
	非都市計畫推估：未來可居住人口數 = 人口淨密度(人/公頃) × 可居住用地面積(公頃)	
	未來人口數(人)：都市計畫區計畫人口數(人) + 非都市土地可居住人口數(人)	
碳容受力	針葉樹、闊針葉混合林、闊葉樹、竹林面積加總(公頃)	2013 年農業統計年報
生態足跡	【公式】生態足跡(全球公頃) = [生產 + 進口 - 出口(公噸)] / 全球生物生產力(公噸/公頃) × 等值因子(全球公頃/公頃)	2013 生態足跡之計算與建置之先期研究
	人均生態足跡(全球公頃/人) = 生態足跡 / 總人口數。	
	糧食足跡：穀類、薯類、糖及蜂蜜、子仁及油籽類、果品類產量加總	2011 年 Key World Energy Statistics
	碳足跡(全球公頃) = CO ₂ 排放量(公噸) × (1 - 1/3 or 1/4) / 森林碳吸收率(1.8 公噸/公頃) × 森林等值因子(全球公頃/公頃)	
	本研究以 IEA 每年公布的《Key World Energy Statistics》第八單元：Energy Indicators 中，世界各國有關二氧化碳排放的資訊，其中 Chinese Taipei_CO2/POP 即代表臺灣的人均二氧化碳排放(單位：公噸)。	

表 2 台灣各區域容受力分析結果綜理表

容受力可乘載人口規模與現況人口	2014 年計算(2013 年統計資料)				單位	
	北部區域	中部區域	南部區域	東部區域		
人口數	10,477,807	5,788,242	6,415,872	558,718	人	
1. 居住容受力	計畫人口推估	2,234,610	1,013,027	2,588,088	466,747	人
	容積率推估	844,995	2,585,611	3,986,916	594,097	人
2. 糧食容受力	種植面積	61,986	299,357	248,422	58,184	公頃
	耕地面積	123,941	290,446	292,119	93,106	公頃
3. 碳容受力	林地面積	70,628,464	29,094,642	32,787,941	2,670,677	公頃

其中二氧化碳吸收地的足跡估算方法為，藉由造林需要增加多少生物生產力區域，以隔離空氣中的二氧化碳。吸收地的計算需減去三分之一或四分之一由海洋吸收的排放量 (IGBP, et al., 2013; Lee, 2015)。然而，GFN (2013) 最新公布的 2011 年版本使用了 Khatiwala et al. (2009) 的海洋吸收資料，其海洋吸收率為 2.3 Pg C yr⁻¹。本計算式採用 IGBP et al. (2013) 在海洋酸化的影響下，二氧化碳的排放量有四分之一是由海洋所吸收。因此，本研究以 2009 年為分界點，2009 年以前的海洋吸收率以 1/3 計算，2009 年以後改以 1/4 計算，此路徑的計算方法為：

二氧化碳吸收地的足跡 (碳足跡) (全球公頃) = CO₂ 排放量 (公噸) × (1 - 1/3 or 1/4) / 森林碳吸收率 (1.8 公噸/公頃) × 森林等值因子 (全球公頃/公頃)

四、結果與討論

4.1 容受力計算結果

居住容受力以「計畫人口推估」及「容積率」推估兩種情境計算之；糧食容受力分別以 2014 年農委會農業統計報表「種植面積」及「耕地面積」兩種情境計算；碳容受力以 2014 年農業統計年報調查結果，加總包含針葉樹、闊葉混交林、闊葉樹、竹林面積作為可吸附碳之林地面積；各項容受力評估成果彙整如表 2。

4.2 碳足跡及糧食足跡計算結果

碳足跡計算的主要資料來源為 IEA 網站 (<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/name-31287-en.html>) 每年所公布的《Key World Energy Statistics》一書，在其中第八單元：Energy Indicators 公布了世界各國二氧化碳排放的資訊，其中 Chinese Taipei_CO2/POP 即代表台灣的人均二氧化碳排放 (單位：公噸)。

研究結果顯示，糧食足跡北部區域最高，達 14,773,708 全球公頃，最低者為東區為 463,736 全球公頃；此外，碳足跡結果也顯示北部區域相較於其他區

域差距甚大，成果綜整表如表 3 所示。

4.3 分析與討論

本研究結合上述容受力分析及生態足跡分析結果 (表 4)，探討台灣各區域目前面臨之課題，並綜整出都會區域的崛起對原有國土空間之規劃、區域間整合可能帶來的影響。

1. 台灣各區域居住容受力皆呈現供過於求，且供給大於需求之程度為南部>北部>中部>東部 (以計畫人口計) 在都市計畫區及非都市土地分析，分析各區域所推估之可供居住人口數，依計畫人口推估北部、中部、南部及東部區域分別為 12,712,417 人、6,801,269 人、9,003,960 人及 1,025,465 人，四大區域皆高於各區域之實際居住人口數，顯示計畫與現況發展之差異。而依容積率推估北部、中部、南部及東部區域分別為 11,322,802 人、8,373,853 人、10,402,788 人及 1,152,815 人；北部區域未來可供居住人口數以計畫人口推估較以容積率推估多出 1,389,615 人。台灣地區絕大多數人口居住於都市計畫地區及甲、乙、丙種建築用地，但礙於資料限制，本研究以都市計畫區及鄉村區檢視現況居住資源，發現北部區域之居住資源分布密集程度高，主要位於台北市全區；中部區域之居住供需差較大地區分布主要集中於臺中市清水區、梧棲區、沙鹿區、豐原區、潭子區、西屯區、北屯區、西區、中區、北區及南區；南部區域之居住供需差較大地區以臺南市和高雄市沿海地區及嘉義市為主要供給地區；東部區域之居住供需差較大地區位於花蓮縣之花蓮市、吉安鄉及臺東縣之台東市，其餘鄉鎮則分佈於規模較小的都市計畫區及鄉村區。

從計算結果顯示，無論以計畫人口推估或以容積率推估檢視台灣各區域現況人口數與居住容受力之關係可發現，現今各區域之居住供給均大於居住需求，若搭配台灣近年人口成長趨緩，甚至即將呈現負成長之趨勢，在居住供需之調適策略重點，應著重於如何調配各區域都市土地及非都市土地之人口，避免都市土地不必要擴張及非都市土地的過度開發。

表 3 各區域糧食及碳足跡分析成果綜理表

生態足跡	2014 年計算 (2011 年統計資料)					單位
	北部區域	中部區域	南部區域	東部區域	全台	
糧食足跡	14,773,708	5,325,183	6,736,666	463,736	27,299,293	全球公頃
人均糧食足跡	1.41	0.92	1.05	0.83	1.05	全球公頃/人
碳足跡	70,096,529	28,478,151	31,822,725	2,670,672	133,068,077	全球公頃
人均碳足跡	6.69	4.92	4.95	4.77	4.88	全球公頃/人

表 4 台灣各區域生態足跡分析成果綜理表

		北部區域	中部區域	南部區域	東部區域	單位
2014 年人口數		10,477,807	5,788,242	6,415,872	558,718	人
居住容受力	計畫人口推估	12,712,417	6,801,269	9,003,960	1,025,465	人
	容積率推估*	11,322,802	8,373,583	10,402,788	1,152,815	人
	供需差	+2,234,610	+1,013,027	+2,588,088	+466,747	人
糧食容受力	容積率推估	+844,995	+2,585,341	+3,986,916	+594,097	人
	糧食足跡	14,773,708	5,325,183	6,736,666	463,736	全球公頃
	種植面積	54,546.87	263,079.23	149,237.8	40,338.98	公頃
耕地面積	耕地面積	123,940.88	290,445.68	292,118.68	93,106.04	公頃
	種植面積	-14,719,161	-5,062,103	-6,587,428	-423,397	公頃
耕地面積	耕地面積	-14,649,767	-5,034,737	-6,444,547	-370,629.9	公頃
	碳足跡	70,096,529	28,478,151	31,822,725	2,670,672	全球公頃
碳容受力	70,628,464	29,094,642	32,787,941	2,670,677	公頃	
供需差	+531,935	+616,491	+965,216	+5	公頃	

* 容積率之計算以各計畫區之基準容積為計算標準。

2.台灣各區域糧食足跡皆大於糧食容受力，顯示台灣糧食產地遠無法供給現況人口之需求，以北部區域在糧食之供需差最懸殊，且耕地利用效率亦較差，形成巨大糧食消費體，不利因應極端氣候之衝擊。

從表 4 可知，北部區域糧食足跡相較其他區域足跡較大，且無論北部、中部、南部或東部區域，其糧

食足跡皆遠大於糧食容受力(種植面積或耕地面積計)。本研究進一步將糧食足跡換算成土地面積，以 2011 年的數據為例，北部區域糧食足跡高達 14,773,708 全球公頃，換算為提供北部區域糧食需求所需之耕地面積相當於 20 個北部區域；中部區域糧食足跡為 5,325,183 全球公頃，換算為中部區域糧食需求所需之

耕地面積，相當於 5 個中部區域；南部區域糧食足跡為 6,736,666 全球公頃，換算為南部區域糧食需求所需之耕地面積，相當於 6.7 個南部區域；東部區域糧食足跡為 463,736 全球公頃，換算為東部區域糧食需求所需之耕地面積，相當於 0.6 個東部區域；易言之，除了東部區域之糧食需求小於供給外，其他各區的糧食需求均遠大於耕地供給量，且此狀況以北部區域最嚴重。總體而言，必須要有 7.6 個台灣土地面積進行糧食生產，才能夠滿足台灣 2011 年的糧食資源使用狀況，此結果明顯呈現出台灣民眾的糧食消費與使用已遠超過土地所能負荷的程度，且以北部區域為最甚。根據糧食容受力分析結果顯示，以目前的糧食生產力而言，無論實際種植面積或耕地面積推估計算之糧食容受力均遠低於現況人口，此代表若無部份糧食之進口，目前台灣糧食生產是不敷使用的，若以區域間之

供需失衡狀態來看，北部區域供需差遠大於南部與中部，北部區域在耕地短缺及缺乏有效耕作之狀況下，已形成一巨大的糧食消費體，需依賴其他區域(南部、中部與東部區域)及國外供給其龐大糧食需求。基於前述結果，對於台灣各區域之可耕地，必須以質與總量控管之方式，更加重視各區域內之耕地保護課題，減少耕地的流失，才能有效降低台灣糧食供需嚴重失衡之問題。

本研究進一步分析 2010-2014 年全台灣農地使用趨勢(圖 2)，研究結果顯示，全台之耕地面積在過去五年皆大於實際種植面積，且在耕地耕種效率上，以北部區域種植效率最差，由圖二可知，北部區域無論在種植面積與耕地面積均逐年流失；由農地轉用經驗可知，農地一旦被轉為建地或工業用地，復耕機會極為渺茫，甚而影響鄰近地區環境，破壞台灣農業永續

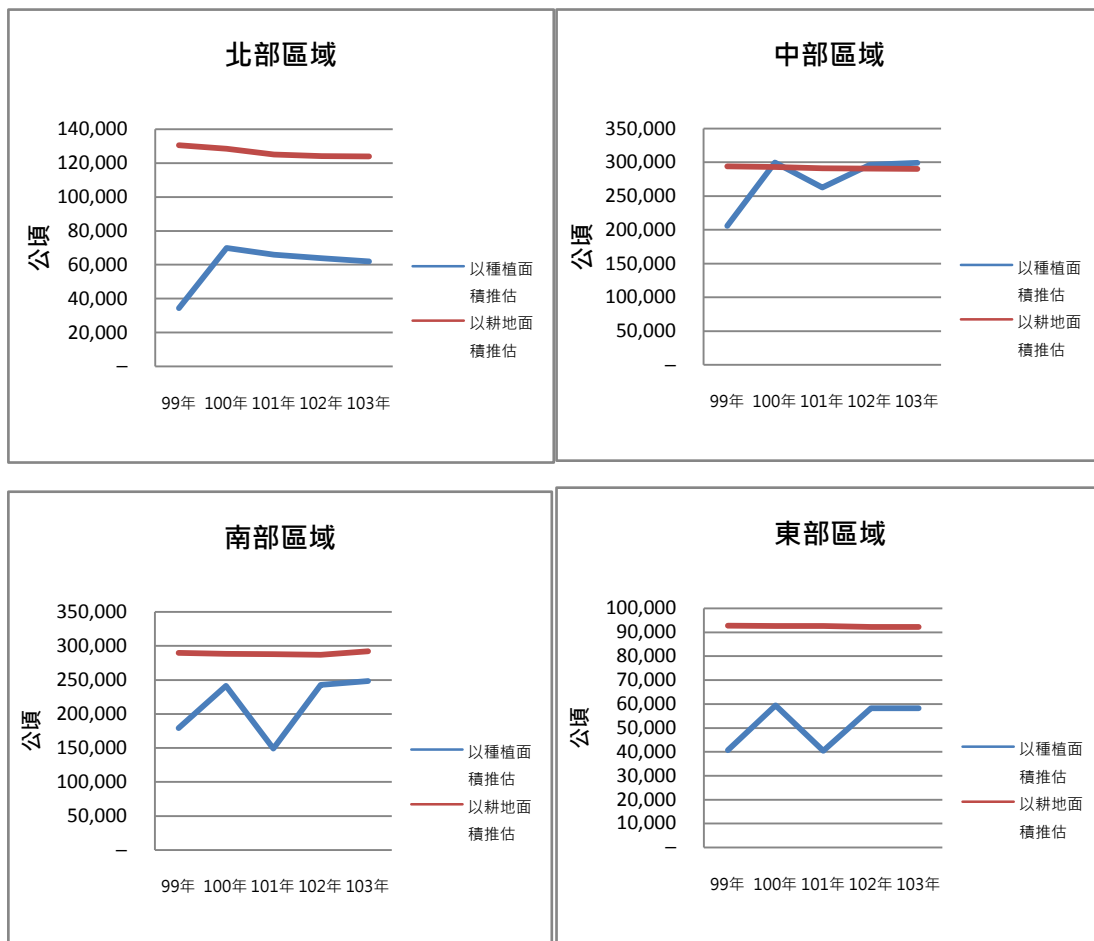


圖 2 2010-2014 年台灣各區域種植面積及耕地面積變化
 (資料來源：2010 年-2014 年農業統計年報)

發展，故在極端氣候威脅下，應正視農地轉用的問題。因此，為確保糧食安全與農業永續經營，應考量在制度上加強對農耕地的保護與維護，減少農地變更為其他用途。

此外，在糧食供需方面，由於國人飲食習慣改變造成稻米需求減少、小麥需求漸增及肉類消費比例逐年上升，因而增加小麥、飼料穀物（如玉米）的需求，再加上大豆等用於加工之需求量大，而小麥、飼料玉米、大豆等糧食國內生產量少，主要依賴進口，造成台灣糧食自給率偏低（約 34%），危害台灣的糧食安全。而為確保台灣之糧食安全，農委會已訂定 2020 年糧食自給率需達到 40%，期望提高農地利用效率，引導種植進口替代作物等以維護台灣之糧食安全，故各區域應提高現有耕地之耕種效率便成為首要應改善之議題。

此外，從圖 2 亦可知，除了中部地區之耕地面積與現有種植面積較接近外，其餘各區域之耕地面積均大於種植面積，尤以北部與東部區域之落差較顯著，故如何有效增加北部與中部區域之耕地種植面積，以增加區域內之糧食供給，並降低北部區域人口糧食的過度消費，以降低糧食依賴進口之程度，成為台灣在糧食課題上的重要議題。

台灣各區域碳容受力與碳足跡約相等，顯示供需平衡，但人均碳足跡偏高，尤以北部區域為甚，台灣各區域碳足跡以北部區域最高，與碳足跡最小的東部區域相較下相差 26 倍之多；且各區域人均碳足跡仍以北部區域為最高（6.69 全球公頃／人，高於全台灣人均碳足跡）。然而比較台灣各區域之碳容受力與碳足跡數值，供需差為正值，呈現供需平衡狀態。而在林地供給之穩定度方面，本研究檢視 2010-2014 年台灣林地面積變化，各區域林地面積皆呈現穩定之狀況，並未大幅增減，這五年間台灣森林覆蓋率達 60.7%，為全球平均值之 2 倍，顯示台灣森林覆蓋及林木蓄積均屬良好，森林碳匯存約 754,000,000 公噸，其中闊葉林型之碳匯存約佔 63%；針葉樹林型次之（21%）；竹林、竹木混淆林佔 3.4%（農業委員會，2015）。台灣「溫室氣體減量及管理法」於 2015 年頒布，未來林業部門

應定期提報排放碳匯存量之資訊，推動森林資源管理及森林功能強化，並持續監測以掌握森林碳匯量之變化作為監控資源供需平衡之參考。雖然現今台灣碳容受力尚能支應台灣總體碳足跡，但利用有效減碳策略以降低偏高的都會區碳足跡，仍是在面對氣變下應具備的調適策略。

綜上所述，居住資源、糧食資源及林地資源於台灣各區域之供需特性彙整如下：居住容受力以北部區域最高，而各區域容受力皆顯示為供大於需之情況，在此情況下，未來台灣無需繼續開發土地作為建地之用。糧食資源之研究結果顯示，台灣各區域糧食資源於各區域內皆呈現供不應求之情形，表示糧食需仰賴進口。由 2010-2014 年農地使用情形資料顯示，台灣各區域耕地無百分之百使用，僅中部區域之耕地使用率較高，應藉由提高農地生產率或提高農地使用率以因應糧食供給不足之窘境。碳資源之供需呈現平衡狀態，2011-2014 年間，農委會資料顯示台灣林地保育相對成功；然而除依賴林地吸付碳排放外，未來因應「溫室氣體減量及管理法」及各年度減碳目標，台灣應擬定相關排放獎懲措施以達成永續發展之目標。

五、結論與建議

世界經濟論壇指出，氣候變遷對糧食生產與水資源供應的預期影響將加劇，其並引述美國國家情報委員會將食物、水、能源與氣候變遷間的關係確定為決定 2030 年世界形勢的四大主要趨勢之一（World Economic Forum, 2015）。該報告第十一版並指出，台灣所在的東亞與太平洋地區面對氣候變遷防範最薄弱的全球風險為「自然災害」、「極端氣候事件」、「失敗的國家治理」（World Economic Forum, 2016）。

另一方面，英國風險管理顧問公司 Verisk Maplecroft 於 2011 年的「自然災害風險圖譜」（Natural Hazards Risk Atlas 2011）報告，將台灣列入四種天災（地震、海嘯、暴風雨、洪水及山崩（土石流））暴險情況具極高風險（extreme risk）的四個國家之一（Verisk Maplecroft, 2011）。由於台灣屬於四面環海的島國，面對氣候變遷影響甚劇，故除了減緩作為之外，

因應氣候變遷還需增加適當之在地調適作為，方可能將衝擊及危機減至最低，促使社會環境朝向永續發展之方向。

綜合上述研究成果，就居住容受力而言，台灣各區域居住容受力皆足夠且供過於求。無論以計畫人口推估或以容積率推估檢視現況人口數，居住容受力皆明顯呈現供給大於人口需求，未來應著重於如何調配都市土地及非都市土地之人口，避免都市無限制擴張與非都市土地的過度開發將為調適重點。

而為了滿足台灣的糧食資源使用狀況。必須有 7.6 個台灣土地面積拿來生產糧食才足夠供養台灣的糧食需求；其中，北部區域糧食足跡相當於 20 個北部區域，中部區域糧食足跡相當於 5 個中部區域，南部區域糧食足跡相當於 6.7 個南部區域，東部區域糧食相當於 0.6 個東部區域。這些結果顯示台灣整體糧食足跡偏高，糧食容受力遠無法提供現有人口對糧食之需求；若再比對各區域之耕地面積與種植面積之落差，則明顯可看出北部區域人均糧食足跡過高，但耕地供給明顯不足與效率不彰；北部區域現今發展成巨大消費體，需要來自其他區域與進口之糧食供給，此一態勢將形成台灣任何一區域若受災，對於北部區域的直接與間接衝擊。因此，如何增加北部與東部區域的耕地種植效率、確保各區域農地總量與農用、減少都市無限制蔓延、尋求降低北部區域在糧食需求的浪費則是相同重要且亟待推動之調適方向。

就碳容受力與碳足跡而言，台灣總體碳容受力與碳足跡成供需平衡之狀態，台灣成功保育林地面積，使森林覆蓋率高達 60.7%，足以承受台灣之碳足跡。未來因應國際情勢及溫室氣體減量及管理法，應更仔細檢視追蹤各年度、產業、甚至個人之碳足跡，以降低各區域過高的人均碳足跡（尤以北部區域為甚），也應建立台灣能源、各類原物料碳排放資料庫，以達成碳中和最終目標。

就土地使用項目而言，在生產方面，除應對於全台現有農地資源進行總量管制與保護，並將其劃設為生產性資源敏感區外，另應提高農地使用效率；而在生活方面，因非都市土地中環境敏感地（如重要棲息

環境、自然保留區、野生動物保護區、國有林及國家公園及沿海保護區等）具有「減緩」災害衝擊之特性，因此應避免都市蔓延至非都市土地，以推動閒置工業區之棕地再開發與政府資產活化利用為策略，並確保優良農田以糧食生產為優先、易致災與環境敏感地區以環境復育為優先，做為未來經濟發展策略之下，國土利用之指導原則。就能源而言，配合交通與能源減量、產業經濟轉型、綠色基盤設施建設、建築物管理等相關政策，提高能源效率、開發低碳能源、發展溫室氣體減量技術，期能減少溫室氣體排放，達到減緩氣候變遷的效果，並提升因應氣候變遷帶來衝擊的能力。

針對台灣主要人口集中的北部區域，後續應進行糧食足跡與碳足跡組成成分的進一步研究，以有效擬定北部區域降低糧食與碳排放的策略，降低巨大消費體對生產地之依賴程度，並應將前述結果配合國土計畫法通過後之相關計畫修訂，將氣候變遷調適策略納入國土計畫層級之戰略考量，以因應台灣在面對氣候變遷衝擊下，在調適策略擬定時各區域之互動考量。

面對環境資源緊縮、資源供需失衡加上氣候變遷災害頻繁的雙重衝擊下，不論由上而下或由下而上不同層級的中央政府、縣市政府或鄉鎮市區公所，針對各自的地理空間區位及人文社經發展當然應有不同的政策及在地具體作法來回應該項挑戰，建議未來調適策略在空間尺度上，應有跨界、跨領域之整合。

參考文獻

- 李永展 (1996)。資源導向的都市主義—超越都市界線的新思維方向。第七屆環境管理與都會發展研討會。高雄市：中山大學。
- 李永展 (2005)。台灣生態足跡趨勢之分析與比較。台北市：行政院農業委員會。
- 李永展，董娟鳴，陳喬琪，呂韋儒 (2015)。由容受力觀點檢視台灣區域發展調適策略之擬訂。第十九屆 (2015 年) 國土規劃論壇。台南市：國立成功大學。
- 李國忠 (2005)。大自然的空調系統人造森林。科學發展，(388)，28-35。

- 封志明，唐焰，楊豔昭（2008）。基於 GIS 的中國人居環境指數模型的建立與應用。*地理學報*，63(12)，1327-1336。
- 黃書禮（2000）。*生態土地使用規劃*。台北市：詹氏書局。
- 黃書禮（1987）。應用生態規劃方法於土地使用規劃之研究—土地使用適宜性分析評鑑準則之研擬與評鑑途徑之探討。台北：國科會專題研究計畫成果報告書。
- 農業委員會（2015）。森林資源現況與展望。*行政院第3465次院會會議簡報*（pp.1-39）。台北：行政院農業委員會。
- 環境保護署（2015）。2015年中華民國國家溫室氣體清冊報告（2015年更新彙編）。台北市：行政院環境保護署。
- Abernethy, V. D. (2001). Carrying capacity: The tradition and policy implications of limits. *Ethics in Science and Environmental Politics*, 1, 9-18.
- Betts, R., Collins, M., Hemming, D., Jones, C., Lowe, J., & Sanderson, M. (2011). When could global warming reach 4°C? *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 369, 67-84.
- Brown, L. R. (2011). *World on the Edge*. NY, USA: Earth Policy Institute, W. W. Norton & Company.
- Daly, H. (1990). Carrying capacity as a tool of development policy: The Ecuadoran Amazon and the Paraguayan Chaco. *Ecological Economics*, 2, 187-195.
- FAO (2015). *Towards a Water and Food Secure Future-Critical Perspectives for Policy-makers*. Marseille, FR: World Water Council.
- GFN (2013). Accounting for demand and supply of the biosphere's regenerative capacity: The National Footprint Accounts' underlying methodology and framework. *Ecological Indicators*, 24, 518-533.
- Gilbert, A. J., & Braat, L. C. (1991). (Eds.) *Modelling for Population and Sustainable Development*. New York: Routledge, 253 pp.
- Graymore, M. L. M., Sipe, N. G., & Rickson, R. E. (2010). Sustaining human carrying capacity: A tool for regional sustainability assessment. *Ecological Economics*, 69, 459-468.
- Hui, C. (2006). Carrying capacity, population equilibrium, and environment's maximal load. *Ecological Modelling*, 192, 317-320.
- IGBP, IOC, & SCOR (2013). *Ocean Acidification Summary for Policymakers – Third Symposium on the Ocean in a High-CO2 World*. Stockholm, Sweden: International Geosphere-Biosphere Programme.
- IPCC(2014). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers*. Cambridge, UK: Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- Kelman, I., Gaillard, J. C., & Mercer, J. (2015). Climate change's role in disaster risk reduction's future: Beyond vulnerability and resilience. *International Journal of Disaster Risk Science*, 6, 21-27.
- Khatiwala, S., Primeau, F., & Hall, T., (2009). Reconstruction of the history of anthropogenic CO2 concentrations in the ocean. *Nature*, 462, 346-350.
- Lee, Y. J. (2015). Land, carbon and water footprints in Taiwan. *Environmental Impact Assessment Review*, 54, 1-8.
- Lee, Y. J., & Peng, L. P. (2014). Taiwan's ecological footprint (1994–2011). *Sustainability*, 6, 6170-6187.
- Mancini, M. S., Galli, A., Niccolucci, V., Lin, D., Bastianoni, S., Wackernagel, M., & Marchettini, N. (2015). Ecological footprint: Refining the carbon footprint calculation. *Ecological Indicators*, 61, DOI: 10.1016/j.ecolind.
- Martire, S., Castellani, V., & Sala, S. (2015). Carrying capacity assessment of forest resources: Enhancing environmental sustainability in energy production at local scale. *Resources, Conservation and Recycling*,

94, 11-20.

- Nieswand, G., & Pizar, P. (1977). How to apply carrying capacity analysis. *Environmental Comment*. Washington DC: The Urban Land Institute, 8-10.
- Odum, H. T., (1971). *Environment, Power, and Society*, New York: Wiley-Interscience.
- OECD/IEA (2015). *Key World Energy Statistics*. Paris, FR: OECD.
- Ortolano, L. (1984). *Environmental Planning and Decision Making*. New York: John Wiley & Sons.
- Rahmstorf, S., Cazenave, A., Church, J., Hansen, J., Keeling, R., Parker, D., & Somerville, R. (2007). Recent climate observations compared to projections. *Science*, 316, 709. Retrieved November 30, 2017 from <http://www.sciencemag.org/content/316/5825/709.full>.
- Rees, W. E. (2000). Eco-footprint analysis: Merits and brickbats. *Ecological Economics*, 32(3), 371-374.
- Schneider, D. M., Godschalk, D. R., & Axler, N. (1978). *The Carrying Capacity Concept as a Planning Tool* (No. 338). American Planning Association.
- Schöpfel, J., Farace, D. J. (2010). Grey literature. In M.J. Bates, & M. N. Maack (Eds.), *Encyclopedia of Library and Information Sciences* (3rd ed.) (pp. 2029–2039). FL, USA: CRC Press.
- Silva, J. A., Eriksen, S., & Ombe, Z. A. (2010). Double exposure in Mozambique's Limpopo River basin. *Geographical Journal*, 176(1), 6-24.
- UNEP (2011). *Year Book 2011: Emerging Issues in Our Global Environment*. Nairobi, Kenya: UNEP.
- UN-Habitat (2011). *Global Report on Human Settlements: Cities and climate Change: Policy Directions (United Nations Human Settlements Programme)*. London, UK: Earthscan.
- UNISDR (2015). *Making Development Sustainable: The Future of Disaster Risk Management. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction*. Geneva, Switzerland: UNISDR.
- United Nations (2009). *The Millennium Development Goals Report*. NY, USA: United Nations.
- United Nations (2015). *United Nations Expert Group Meeting on the Post-2015 Era: Implications for the Global Research Agenda on Population and Development- Report of the Meeting*. NY, USA: United Nations.
- Verisk Maplecroft (2011). *Natural Hazards Risk Atlas 2011*. Bath, UK: Verisk Maplecroft.
- Wackernagel, M. (2014). Comment on “ecological footprint policy? land use as an environmental indicator”. *Journal of Industrial Ecology*, 18(1), 20-23.
- Wackernagel, M., & Rees, W. E. (1996). *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. Gabriola Island, CA: New Society Publishers.
- World Bank (2010). *The World Bank Annual Report*. Washington, D.C., USA: World Bank.
- World Bank (2015). *World Bank Annual Report 2015*. Washington, D. C., USA: World Bank.
- World Economic Forum (2015). *The Global Risks Report 2015 (10th ed.)*. Geneva, Switzerland: World Economic Forum.
- World Economic Forum (2016). *The Global Risks Report 2016 (11th ed.)*. Geneva, Switzerland: World Economic Forum.

REFERENCES in English

- Abernethy, V. D. (2001). Carrying capacity: The tradition and policy implications of limits. *Ethics in Science and Environmental Politics*, 1, 9-18.
- Betts, R., Collins, M., Hemming, D., Jones, C., Lowe, J., & Sanderson, M. (2011). When could global warming reach 4°C? *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 369, 67-84.
- Brown, L. R. (2011). *World on the Edge*. NY, USA: Earth Policy Institute, W. W. Norton & Company.
- Committee on Agriculture (2015). Current situation and

- prospect of forest resources. *Briefing to the No. 3465 Meeting of the Executive Yuan* (pp. 1-39). Taipei: Committee on Agriculture.
- Daly, H. (1990). Carrying capacity as a tool of development policy: The Ecuadoran Amazon and the Paraguayan Chaco. *Ecological Economics*, 2, 187-195.
- Environmental Protection Administration (2015). *Report of the National Greenhouse Gas Inventory of the Republic of China for the Year 2015 (2015 updated version)*. Taipei: Environmental Protection Administration.
- FAO (2015). *Towards a Water and Food Secure Future- Critical Perspectives for Policy-makers*. Marseille, FR: World Water Council.
- Feng Z. M., Tang, Y., & Yang, Y. Z. (2008). The establishment and application of Chinese Habitat Environment Index model based on GIS. *Geography*, 63(12), 1327-1336.
- GFN (2013). Accounting for demand and supply of the biosphere's regenerative capacity: The National Footprint Accounts' underlying methodology and framework. *Ecological Indicators*, 24, 518-533.
- Gilbert, A. J., & Braat, L. C. (1991). (Eds.) *Modelling for Population and Sustainable Development*. New York: Routledge, 253 pp.
- Godschalk, D. & Axler, N. (1977). *Carrying Capacity Applications in Growth Management: A Reconnaissance*. Report to the U.S. Department of Housing and Urban Development. HUD-829-77. Washington, DC.
- Graymore, M. L. M., Sipe, N. G., & Rickson, R. E. (2010). Sustaining human carrying capacity: A tool for regional sustainability assessment. *Ecological Economics*, 69, 459-468.
- Huang, S. L. (1987). *Application of Ecological Planning Method in Land Use Planning: Research-Evaluation Criteria for Land Use Suitability Analysis and Evaluation Approach*. Taipei: National Science Council research project.
- Huang, S. L. (2000). *Ecological Land Use Planning*. Taipei: Janes Bookstore.
- Hui, C. (2006). Carrying capacity, population equilibrium, and environment's maximal load. *Ecological Modelling*, 192, 317-320.
- IGBP, IOC, & SCOR (2013). *Ocean Acidification Summary for Policymakers – Third Symposium on the Ocean in a High-CO2 World*. Stockholm, Sweden: International Geosphere-Biosphere Programme.
- IPCC(2014). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers*. Cambridge, UK: Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- Kelman, I., Gaillard, J. C., & Mercer, J. (2015). Climate change's role in disaster risk reduction's future: Beyond vulnerability and resilience. *International Journal of Disaster Risk Science*, 6, 21-27.
- Khatiwal, S., Primeau, F., & Hall, T., (2009). Reconstruction of the history of anthropogenic CO2 concentrations in the ocean. *Nature*, 462, 346-350.
- Lee, G. Z. (2005). Nature's air conditioning system human-made forest. *Science Development*, (388), 28-35.
- Lee, Y. J. (1996). Resource-based Urbanism-A new way of thinking that transcends urban boundaries. *The Seventh Symposium of Environmental Management and Metropolitan Development*. Kaohsiung: Sun Yat-sen University.
- Lee, Y. J. (2005). *Analysis and Comparison of Taiwan's Ecological Footprint*. Taipei, Taiwan: Committee of Agriculture.
- Lee, Y. J. (2015). Land, carbon and water footprints in Taiwan. *Environmental Impact Assessment Review*, 54, 1-8.
- Lee, Y. J., & Peng, L. P. (2014). Taiwan's ecological footprint (1994–2011). *Sustainability*, 6, 6170-6187.
- Lee, Y. J., Tung, C. M., Chen, C. C., & Lu, W. R. (2015). From the carrying capacity perspective to examine

- adaptation strategies for regional development in Taiwan. *Proceedings of the 19th (2015) Land Use Forum on*. Tainan: National Cheng-Kung University.
- Mancini, M. S., Galli, A., Niccolucci, V., Lin, D., Bastianoni, S., Wackernagel, M., & Marchettini, N. (2015). Ecological footprint: Refining the carbon footprint calculation. *Ecological Indicators*, 61, DOI: 10.1016/j.ecolind.
- Martire, S., Castellani, V., & Sala, S. (2015). Carrying capacity assessment of forest resources: Enhancing environmental sustainability in energy production at local scale. *Resources, Conservation and Recycling*, 94, 11-20.
- Nieswand, G., & Pizar, P. (1977). How to apply carrying capacity analysis. *Environmental Comment*. Washington DC: The Urban Land Institute, 8-10.
- Odum, H. T., (1971). *Environment, Power, and Society*, New York: Wiley-Interscience.
- OECD/IEA (2015). *Key World Energy Statistics*. Paris, FR: OECD.
- Ortolano, L. (1984). *Environmental Planning and Decision Making*. New York: John Wiley & Sons.
- Rahmstorf, S., Cazenave, A., Church, J., Hansen, J., Keeling, R., Parker, D., & Somerville, R. (2007). Recent climate observations compared to projections. *Science*, 316, 709. Retrieved November 30, 2017 from <http://www.sciencemag.org/content/316/5825/709.full>.
- Rees, W. E. (2000). Eco-footprint analysis: Merits and brickbats. *Ecological Economics*, 32(3), 371-374.
- Schneider, D. M., Godschalk, D. R., & Axler, N. (1978). *The Carrying Capacity Concept as a Planning Tool* (No. 338). American Planning Association.
- Schöpfel, J., & Farace, D. J. (2010). Grey literature. In M.J. Bates, & M. N. Maack (Eds.), *Encyclopedia of Library and Information Sciences* (3rd ed.)(pp. 2029–2039). FL, USA: CRC Press.
- Silva, J. A., Eriksen, S., & Ombe, Z. A. (2010). Double exposure in Mozambique's Limpopo River basin. *Geographical Journal*, 176(1), 6-24.
- UNEP (2011). *Year Book 2011: Emerging Issues in Our Global Environment*. Nairobi, Kenya: UNEP.
- UN-Habitat (2011). *Global Report on Human Settlements: Cities and climate Change: Policy Directions* (United Nations Human Settlements Programme). London, UK: Earthscan.
- UNISDR (2015). *Making Development Sustainable: The Future of Disaster Risk Management. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction*. Geneva, Switzerland: UNISDR.
- United Nations (2009). *The Millennium Development Goals Report*. NY, USA: United Nations.
- United Nations (2015). *United Nations Expert Group Meeting on the Post-2015 Era: Implications for the Global Research Agenda on Population and Development- Report of the Meeting*. NY, USA: United Nations.
- Verisk Maplecroft (2011). *Natural Hazards Risk Atlas 2011*. Bath, UK: Verisk Maplecroft.
- Wackernagel, M. (2014). Comment on “ecological footprint policy? land use as an environmental indicator”. *Journal of Industrial Ecology*, 18(1), 20-23.
- Wackernagel, M., & Rees, W. E. (1996). *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. Gabriola Island, CA: New Society Publishers.
- World Bank (2010). *The World Bank Annual Report*. Washington, D.C., USA: World Bank.
- World Bank (2015). *World Bank Annual Report 2015*. Washington, D. C., USA: World Bank.
- World Economic Forum (2015). *The Global Risks Report 2015 (10th ed.)*. Geneva, Switzerland: World Economic Forum.
- World Economic Forum (2016). *The Global Risks Report 2016 (11th ed.)*. Geneva, Switzerland: World Economic Forum.