

# 生態足跡之計算及歷年 ( 1994-2019 ) 比較

計畫類別：單一計畫

計畫編號：109 林發-08.1-保-25

執行期間：109 年 9 月 1 日至 109 年 12 月 31 日

執行機構：財團法人中華經濟研究院

計畫主持人：李永展 研究員

計畫參與人員：翟磊、吳柏澍



## 摘要

本計畫旨在延續過往生態足跡之計算成果，持續追蹤國際生態足跡估算法變革，並建立台灣長期生態足跡變化的趨勢，本計畫接續計算 2012 年到 2018 年的台灣生態足跡，建置台灣生態足跡的資料庫。因此，本計畫主要的研究範圍即為計算 2012 年到 2018 年我國的生態足跡，並與國際生態足跡研究趨勢相互比較，同時檢討 1994 年到 2011 年我國生態足跡的研究和計算結果。

首先，本計畫檢討歷年生態足跡發現，由於碳足跡的固碳率數值差異，造成我國碳足跡增加將近一倍，連帶影響我國整體碳足跡 2-3 全球公頃／人，本計畫採用最新的碳足跡計算方式，修正過往的生態足跡資料庫。接著，本計畫參考「全球足跡網絡」的「國家足跡估算」手冊，更新 2012 年到 2018 年各年份之等值因子，分別計算各項生物生產力土地足跡後再進行加總。本計畫研究發現，台灣生態足跡從 2012 年的 6.61 全球公頃／人，穩定下降到 2018 年的 6.46 全球公頃／人；其中，耕地足跡穩定下降、碳足跡則小幅上升，這個趨勢與世界趨勢雷同，但台灣的碳足跡佔比近 7 成，略高於世界平均佔比（6 成）。第三，本計畫發現漁業足跡與碳足跡各有 2 項資料來源，導致出現 4 種計算結果，數值最大差距為 1 成；經過專家學者座談會的討論，為求資料的原始性及完整性，本計畫決定採用最貼近原始資料的資料來源，並且囊括最多項目，盡量反映第一手資料及其完整性，使研究結果更貼近現實情況，因此，漁場足跡採用漁業統計年報，碳足跡則採用我國能源局能源統計年報之資料。

本計畫追蹤國際前瞻研究，發現生態足跡已經透過生態超限日、地球鐘等社會溝通工具，進行永續與環境保護政策的倡議，經過本計畫計算，我國 2018 年的生態超限日為 3 月 14 日。易言之，在 2018 年 3 月 14 日台灣就已經將我國生物生產力土地所能提供的自然資源消耗殆盡，剩下將近九個月的時間都在超支其他國家或未來世代的資源。另外，國際研究已經開始倡導計算地區縣市層級的生態足跡，以強化環境政策的效果。本計畫採用最新的「混合型」計算方式，結合傳統生態足跡與地區級的碳足跡，針對台北市計算 2018 年的「混合型地區級生態足跡」後發現，2018 台北市的碳足跡高達 1.62 全球公頃／人，生態足跡為 2.13 全球公頃／人。

最後，在全球重視碳排放議題並倡導減碳的現在，該如何強調減碳的重要性並實際達成減碳的目標，是我國未來相關能源及環境政策必須重點努力的方向。本計畫建議相關單位必須仔細考量有效的社會溝通工具與方式，未來若有經費支應，建議利用網站或

App 製作互動介面，將生態足跡及永續發展的概念傳達予社會大眾，且能確實地落實在日常生活之中。在學術面向上，第一，建議可以探討台灣生態赤字持續增加的原因。第二，目前生態足跡的研究方法無法反映農地多期復種與遠洋漁業的生產特性，可能造成台灣生態足跡被高估而生態標竿被低估的情況，因此，應儘速建立一個不同於歐美典範的亞洲足跡計算典範。第三，應持續建置第一手資料，使資料來源完備，例如建立地區級的食物生產與消費履歷，在未來糧食安全、食物安全等意義上都有相當大的效益。

關鍵詞：生態足跡、碳足跡、生態標竿、生態赤字、生態超限日、等值因子

## Abstract

This project aims to continue the calculation results of Taiwan's previous ecological footprint research, to track the changes in the international ecological footprint estimation method, to establish the trend of Taiwan's long-term ecological footprint changes, to update Taiwan's ecological footprint from 2012 to 2018, and to construct Taiwan's ecological footprint database. Therefore, the main research scope of this project is to update Taiwan's ecological footprints to 2018, and compare them with international ecological footprint research trends, while reviewing the ecological footprint research and calculation results over the past years.

First, the review of the ecological footprint of this project found that due to the difference in the carbon sequestration rate of the carbon footprint, Taiwan's carbon footprint has nearly doubled, which will affect Taiwan's overall carbon footprint by 2-3 gha per person. This project used the latest carbon footprint calculation method to revise the ecological footprint database in the past. Next, this project updated the Equivalent Factors for each year from 2012 to 2018 with reference to the NFA Guidebook to calculate the footprints of each bioproductive land and then add them up. It was pointed out that Taiwan's ecological footprint in 2012 was 6.61 gha per person, and then steadily declined to 6.46 gha per person in 2018; among them, the cropland footprint had steadily declined, while the carbon footprint had increased slightly. Although this trend is similar to the global trend, Taiwan's carbon footprint accounts for nearly 70%, slightly higher than the world average of 60%. Third, this project found that fishing ground footprint and carbon footprint each have two data sources, resulting in four calculation results, with a maximum difference of 10%. After discussion at the expert panels, in order to seek the originality and completeness of the data, this project decided to use the data source closest to the original data, to include the maximum numbers of items, to reflect the first-hand data and its completeness, and to make the research results close to the reality. Therefore, the fishing ground footprint uses the annual fishery statistics, and the carbon footprint uses the data from the Energy Statistical Annual Reports of the Bureau of Energy, Ministry of Economic Affairs.

This project followed the international forward-looking research and found that the ecological footprint has been implemented through social communication tools such as the Earth Overshoot Day, the Earth Clock, and other social communication tools to propose sustainability and environmental protection policies. After calculation by this project, Taiwan's Overshoot Day in 2018 was March 13. Restated, on March 13, 2018, Taiwan exhausted the natural resources that Taiwan's bioproductive lands can provide, and the remaining nearly nine

months appropriated the resources of foreign areas and future generations. In addition, international research has begun to advocate the calculation of regional ecological footprints in order to strengthen the effect of environmental policies. This project used the latest "hybrid" calculation method, combining traditional ecological footprint and regional carbon footprint, and calculated the ecological footprints for Taipei. In 2018, the "hybrid regional ecological footprint" found that the carbon footprint of Taipei in 2018 was as high as 1.62 gha per person, and the ecological footprint was 2.13 gha per person.

Finally, as the world attaches importance to carbon emission issues and advocates carbon reduction, how to emphasize the importance of carbon reduction and achieve the goal of carbon reduction is part of Taiwan's future energy and environmental policies that must be focused on. This project suggests that relevant organizations must carefully consider effective social communication tools and methods. If funds are available in the future, it is recommended to use websites or Apps to create interactive interfaces to convey the concept of ecological footprint and sustainable development to the public, and it can be implemented in daily life. On the academic front, first, it is recommended to explore the reasons for the continued increase in Taiwan's ecological deficit. Second, the current ecological footprint research methods cannot reflect Taiwan's production characteristics of multiple cropping of agricultural lands and offshore fisheries, which may cause Taiwan's ecological footprint to be overestimated and ecological benchmark to be underestimated. An Asian footprint paradigm that is different from the European and American models should be established. Third, we should continue to build first-hand data to make the data sources complete. For example, the establishment of regional food production and consumption inventories will have considerable benefits in the sense of future food security and food safety.

Keywords: Ecological Footprint, Carbon Footprint, Ecological Benchmark, Ecological Deficit, Earth Overshoot Day, Equivalent Factor

# 目錄

摘要.....	I
ABSTRACT.....	III
第一章、緒論.....	1
第一節、緣起.....	1
第二節、計畫目標.....	2
第三節、工作範圍與內容.....	2
第二章、文獻回顧.....	5
第一節、生態足跡.....	5
第二節、國際生態足跡研究趨勢.....	10
第三節、國內生態足跡相關研究.....	14
第三章、研究方法.....	17
第一節、文獻回顧法.....	17
第二節、生態足跡計算分析.....	17
第三節、專家學者座談.....	18
第四章、結果與討論.....	19
第一節、專家學者座談會討論與結論.....	19
第二節、1994 年至 2011 年生態足跡研究之檢討.....	20
第三節、2012 年至 2018 年生態足跡研究結果.....	25
第四節、生態赤字.....	40
第五節、生態超限日.....	45
第五章、混合型生態足跡研究方法：以台北市為例.....	51
第一節、地區級生態足跡的計算方式：比例法、個體抽樣法與混合法.....	51
第二節、台北市的地區級生態足跡計算—以混合法進行計算.....	52
第三節、研究結果與討論.....	57
第四節、混合型算法之台北生態足跡與生態赤字.....	60
第六章、結論與建議.....	65
第一節、結論.....	65

第二節、建議.....	67
參考文獻 .....	69
附錄一、第一次專家學者座談會會議記錄.....	75
附錄二、第二次專家學者座談會會議記錄.....	78



## 圖目錄

圖 1、生態足跡計算公式 .....	8
圖 2、生態足跡、生態標竿與生態赤字之關係 .....	9
圖 3、生態標竿計算方式 .....	10
圖 4、生態足跡與人類發展指數對照圖 .....	12
圖 5、 $Y_c=1.8$ 及 $Y_c=3.4$ 之 2000 年至 2011 年碳足跡 .....	23
圖 6、 $Y_c=1.8$ 及 $Y_c=3.4$ 之 2000 年至 2011 年生態足跡 .....	23
圖 7、 $Y_c=2.7$ 及 $Y_c=3.4$ 之 2000 年至 2011 年生態足跡 .....	25
圖 8、台灣 2012 年至 2018 年生態足跡變化 .....	37
圖 9、台灣 2012 年至 2018 年生態足跡變化 ( 統一資料來源 ) .....	38
圖 10、台灣 2012 年至 2018 年各項足跡之變化 .....	39
圖 11、台灣 2012 年至 2018 年各項足跡變化趨勢 .....	40
圖 12、台灣 2012 年至 2018 年各項足跡比例變化 .....	40
圖 13、台灣 1994 年至 2018 年生態足跡、生態標竿、生態赤字變化趨勢 .....	43
圖 14、全球生態足跡、生物容受力及人口數變化趨勢 .....	44
圖 15、全球各項足跡變化趨勢 .....	45
圖 16、歷年地球生態超限日 .....	46
圖 17、地球鐘 .....	49
圖 18、1994 年至 2018 年台灣生態超限日 .....	49
圖 19、我們需要幾個地球？ .....	50
圖 20、台灣 1998-2017 年電力消耗度數 ( 依照用途別 ) .....	60
圖 21、台北市土地使用分區圖 .....	61
圖 22、波蘭 Wroclaw 的生態赤字疊圖分析 .....	62
圖 23、GIS 疊圖分析台北市生態足跡 .....	63



## 表目錄

表 1、六種生物生產力土地類型 .....	7
表 2、1994 年至 1999 年等值因子修正前後之生態足跡 .....	21
表 3、2000 年至 2011 年固碳率不同對碳足跡之影響.....	22
表 4、2000 年至 2011 年固碳率不同對生態足跡之影響.....	22
表 5、2000 年至 2011 年生態足跡 .....	23
表 6、固碳率不同對生態足跡之影響.....	24
表 7、生態足跡計算分類項目 .....	26
表 8、等值因子.....	27
表 9、生態足跡資料來源 .....	28
表 10、2012 年至 2018 年耕地各消費項目總消費量 .....	29
表 11、2012 年至 2018 年歷年人口數 .....	29
表 12、2012 年至 2018 年耕地生物生產力.....	29
表 13、2012 年至 2018 年耕地足跡.....	30
表 14、2012 年至 2018 年牧草地各消費項目總消費量.....	30
表 15、2012 年至 2018 年牧草地生物生產力 .....	31
表 16、2012 年至 2018 年牧草地足跡 .....	31
表 17、2012 年至 2018 年水產類總消費量.....	32
表 18、2012 年至 2018 年漁場足跡之世界生物生產力.....	32
表 19、2012 年至 2018 年漁場足跡.....	32
表 20、2012 年至 2018 年木材總消費量 .....	33
表 21、2012 年至 2018 年森林世界生物生產力 .....	33
表 22、2012 年至 2018 年森林 ( 林產品 ) 足跡 .....	34
表 23、2012 年至 2018 年建成地面積 .....	34
表 24、2012 年至 2018 年建成地足跡 .....	35
表 25、2012 年至 2018 年人均碳排放量 .....	36
表 26、2012 年至 2018 年碳足跡 .....	36
表 27、2012 年至 2018 年不同資料來源所得之生態足跡.....	36
表 28、2012 年至 2018 年台灣生態足跡與生物生產力土地足跡.....	37
表 29、2012 年至 2018 年台灣生態標竿 ( 生物容受力 ) .....	41
表 30、2012 年至 2018 年台灣生態赤字變化 .....	42
表 31、1994 年至 2018 年台灣生態赤字變化 .....	42
表 32、1994 年至 2018 年台灣生態標竿與生態足跡之比值 .....	47
表 33、1994 年至 2018 年台灣生態超限天數 .....	48
表 34、台北市混合型碳足跡計算表.....	57
表 35、2018 年台灣與台北的 ( 混合型 ) 生態足跡換算表.....	58
表 36、台北市生物容受力計算內容.....	61



# 第一章、緒論

## 第一節、緣起

生態足跡 (Ecological Footprint, EF) 是一個廣泛受到應用的永續性指標 (Galli et al., 2014; Lin et al., 2018b; Mancini et al., 2018; Wackernagel et al., 2018)，國際間由「全球足跡網絡」(Global Footprint Network, GFN) 定期發布研究報告，公布全球 234 個地區的生態足跡數字，並更新計算方式與相關參數 (Lin et al., 2019)，但並沒有包含台灣的生態足跡。因此，自 1998 年台灣首度計算生態足跡以來 (李永展、陳安琪，1998b)，已累積 1994 年至 2014 年的數據<sup>1</sup>，本計畫的研究目的即計算 2012 年至 2018 年台灣的生態足跡，並延續更新 1994 年以來的數據資料庫 (李永展、陳安琪，1998b；李永展，2005b；李永展，2006；Lee & Peng, 2014)。

另一方面，2020 年 COVID-19 疫情席捲全球，全球封城防疫管制措施使得製造業停頓、大幅減少化石燃料車輛的使用，製造業大國長期空氣污染的煙塵霧霾，都「煙消雲散」了 (Le et al., 2020)；甚至，由於人類蟄伏相關的經濟活動趨緩，根據「全球足跡網絡」的最新研究 (Earth Overshoot Day, 2020)，在 COVID-19 疫情衝擊下，由於人類活動產生的生態足跡在 2020 年大幅下降，數據顯示森林產品 (forest product) 的足跡下降 8.4%、糧食作物持平不變 (但人口仍成長 1%)<sup>2</sup>、碳足跡則大幅下降 14.5%，這是自 2008 年全球金融危機以來，碳足跡首度減緩排放的趨勢。這是否意味著，瘟疫是地球的退燒劑？

透過「全球足跡網絡」的生態足跡作為量度依據，我們可以發現，全球在瘟疫下主要溫室氣體排放量下降，同時，由於經濟活動放緩使得森林產品減緩出產，意味著森林碳吸收率相對上升。生態足跡是一項以計算作為基礎的系統性指標，其重點在於認知地球所蘊涵的生物生產量是有限的，且地球上的生命是由這些有限的資源所支持 (Wackernagel et al., 2018)。

更廣泛地說，生態足跡提供綜合性且多面向的研究方法，使研究者得以追蹤人類社會對自然資源的利用以及超支情況，並以此得知人類行為對環境和生物多樣性所帶來的衝擊 (Galli et al., 2014; Mancini et al., 2018)，這是生態足跡作為環境永續的指標所能

---

<sup>1</sup> 由計畫主持人自主更新至 2014 年，但 2012 年至 2014 年的細項數據未計算也尚未檢討。

<sup>2</sup> 根據聯合國人口部門顯示人口成長率 2018 年為 1.12%，2019 年為 1.08%，2020 年為 1.00% (UNFPA, 2020)。

帶來更廣泛影響。以這樣的方式理解生態足跡的意涵，在受到新冠肺炎影響的 2020 年，是否因為疫情的衝擊反而使地球環境的天秤又稍微往永續發展的方向傾斜一點。本計畫的研究謎題便從生態足跡數據的探索上慢慢地展開。

## 第二節、計畫目標

回望台灣在 2020 年的疫情應對防護中，表現相對正面樂觀，那麼計算台灣的生態足跡，變成檢視疫情與永續發展進程相關研究的重要任務。因此，本計畫主要目的即在量度 2012 年至 2018 年台灣的生態足跡，此係 2014 年以來首次更新台灣的生態足跡資料。此外，本計畫的研究結果得以與目前國際間最新的生態足跡研究接軌，並延續 1994 年以來，台灣開始計算我國生態足跡的研究經驗（李永展、陳安琪，1998b；李永展，2006）。

由於台灣未被計入全球足跡網絡（GFN）的足跡計算之中，國際間少有我國的相關研究成果及數據資料，因此台灣的生態足跡長期以來由農委會林務局、中華經濟研究院（Lee & Peng, 2014；李永展、陳安琪，1998b；李永展，2005b；李永展，2006）等國內機關（構）進行調查計算，並建構台灣歷年的生態足跡研究資料。目前國內已經計算的生態足跡區間自 1994 年至 2011 年為止，2012 年後的台灣生態足跡尚未有研究進行系統性計算，這是本計畫主要的研究範圍之一。

本計畫旨在承接往年計畫，除了以最新研究趨勢和計算方法重新檢視我國自 1994 年至 2011 年之生態足跡，亦新增我國 2012 年至 2018 年之生態足跡，持續建置及更新台灣生態足跡的資料庫。除此之外，本計畫期望將我國生態足跡研究及發展持續更新並與國際趨勢接軌，持續地追蹤國際生態足跡算法變革（Galli et al., 2020; Lin et al., 2018b），並建立長期追蹤台灣生態足跡變化趨勢的研究發展。因此，本計畫主要的研究範圍即為更新 2012 年至 2018 年我國生態足跡，並與國際生態足跡研究趨勢相互比較，同時檢討 1994 年至 2011 年生態足跡的研究和計算結果，期望透過本計畫持續發展我國生態足跡相關的研究並與全球趨勢接軌。

## 第三節、工作範圍與內容

綜上所述，本計畫旨在檢討我國 1994 年至 2011 年生態足跡研究，並更新 2012 年至 2018 年台灣的生態足跡，透過文獻回顧以及檢視全球最新的相關研究資料與國際生

態足跡研究成果進行比較，期望透過本計畫持續推動我國生態足跡的研究並與全球趨勢接軌。本計畫主要的工作內容如下：

1. 蒐集並整理 2012 年至 2018 年全球生態足跡相關研究進展與趨勢。
2. 檢討台灣 1994 年至 2011 年生態足跡研究，並以全球最新的研究方法重新計算歷年生態足跡資料，探討台灣與國際研究間的異同與趨勢分析。
3. 計算台灣 2012 年至 2018 年生態足跡，持續更新台灣生態足跡資料庫。
4. 討論台灣生態足跡趨勢及其原因，反思國內因應氣候變遷之政策與行動。
5. 提供政策及社會溝通的應用方式，使生態足跡研究反映至社會大眾日常生活，傳達永續發展與環境行動的重要性。
6. 嘗試建立地方性和區域性的生態足跡研究方法，使生態足跡研究能更精確地反映區域特性（生產、消費、日常資源消耗等）以及真實社會情況。





## 第二章、文獻回顧

### 第一節、生態足跡

#### 1. 生態足跡的概念：永續性的衡量指標

生態足跡是近年來國際社會廣泛使用的永續性 (sustainability) 監測指標。生態足跡創新之處在於，將永續發展由敘事性 (narrative) 的論述轉換成可計算性的 (accounting) 指標。這個指標的特性將複雜的統計項目轉換成清晰的「單一數值」——全球性公頃 (global hectare, gha)——這使得永續性成為可長時間追蹤、可比較、可與其他指標對話交流的全面性環境監測指標 (陳盛通、張惠, 2016; Lee, 2015; Song & Pan, 2020)。此外，生態足跡可以直接或間接地量化人類社會與自然環境的相互關係，亦能同時作為人類社會與生態系服務的指標，一方面了解人類活動對自然環境的衝擊，另一方面計算生態系服務所能提供予人類的自然資源 (Mancini et al., 2018)。

生態足跡一詞由「生態」與「足跡」兩個字彙組成，生態 (ecological) 就是指稱具有生養能力 (也就是生物生產力) 的生態環境，所謂的生養能力指的是生態環境能夠涵容同化的能力，指涉環境的自淨能力；足跡 (footprint) 是指人類活動留下的痕跡，又可以指稱實際佔用的土地面積。因此，結合兩個詞彙的意義，生態足跡又可理解為「環境佔用面積」。在實務操作上，生態足跡即是利用「佔用面積」的觀點，實際計算某特定區域 (通常是國家) 的人類社會消費活動的總和，將這個總和均分給總人口，就能夠得到「人均佔用的環境面積」——也就是生態足跡 (Wackernagel & Rees, 1996)。

生態足跡是一個測量永續發展的操作性工具。永續發展最早為 1915 年加拿大保育委員會所倡議：「每一世代均有使用自然資本的權利，但是必須恪遵不減損自然資本的原則」 (Sitarz, 1998)；接著，最早為各地引用的報告是《布蘭蓮報告》 (The Brundtland Report) 中「滿足當代之需要，而不損及後代滿足其需要的發展機會」 (WCED, 1987)。為了永續發展，美國環境經濟學者 Daly (1990) 認為，概念上應該從量性擴張的永續「成長」 (growth) 轉型為質性提

升的永續「發展」(development)，「成長是規模的量性增加；發展則是質性的提升或是釋放潛力」。

因此，Daly 建議需建立永續發展的操作性原則，這個原則就是建立「環境容受力」—「在未永久減損某集居地人口生態系生產力下，該集居地能支持的最大人口數」(Daly, 1990)。另一方面，聯合國 1992 年在里約 (Rio) 召開的地球高峰會 (Earth Summit) 所發布的「21 世紀議程」(Agenda 21) 中，也同樣提倡「有數據支持的資料提升決策品質」，為建立環境監測指標提供論述的有力基礎。

生態足跡可以視為「環境容受力」觀念的典範轉移。在過去，探討「環境容受力」即是一塊土地的餵養能力(包含糧食、水資源、能源、社會福利等)，發現容受力的計算需要考慮區域特性、以及計算的相關定義模糊的問題。因此，1992 年，加拿大生態經濟學家 Rees 嘗試回應 Daly (1990) 的觀點，首度提出「生態足跡」的概念 (Rees, 1992)，徹底翻轉「人之於土地」的環境容受力觀念，將艱澀難解的環境容受力轉換成「土地之於人」的生態足跡。

隨後，Wackernagel & Rees (1996) 將「生態足跡」轉換成六種類型的「生物生產力土地」(biologically productive land) 的操作形式，奠定了生態足跡作為永續發展指標的方法論。這一套計算方式的特性力求可比較性、可追蹤性、具有修正潛力的全面性指標，在資料允許的前提下，迅速地建立全球足跡網絡 (GFN) 的跨國生態足跡資料庫，並且以 2 年為基期發布「國家足跡估算」(National Footprint Account, NFA)，發布全球 234 個地區/國家的生態足跡變化趨勢與計算方法的參考手冊 (guidebook) (Lin et al., 2019)。

## 2. 生態足跡的計算

### (1) 計算生態足跡的基本公式

計算生態足跡的目的是為了回應以下問題：需要多少生態圈 (biosphere) 的再生能力支應人類活動？更精確地問，特定的人類活動 (糧食、林業等) 需要多少再生能力？針對上述問題，生態足跡的計算有下列基本假設 (Wackernagel & Rees, 1996)：

- I. 地球支持所有生物生存的生物生產力是有限的，並且，人類活動可以由生態圈 (biosphere) 的再生能力吸收同化。

II. 此再生能力得以被量度，稱之為生物容受力（biocapacity），而生物生產力則假設是永續的。

計算實務上，計算人類活動的基本服務即可，不重複計算兩種以上的服務（越精細即包含越多的自然機能）。生態足跡共可分為六種「生物生產力土地」（表 1）（Lin et al, 2019）。

表 1、六種生物生產力土地類型

耕地： 穀類、堅果、馬鈴薯.等	牧草地： 肉類	森林： 木材
漁場： 水產類	建成地： 住宅與設施用地	碳足跡： 轉換二氧化碳之土地

資料來源：Lin et al. (2019)

根據 NFA 公布的最新參考手冊（Lin et al., 2019），這六項生物生產力土地分別為：耕地、牧草地、森林、漁場、建成地與碳足跡（舊稱能源地）。每一項土地根據分類項目，計算其總消費項目，例如耕地包含穀類、薯類等作物；牧草地則計算肉類和奶類等總消費量，因此，這種計算方式被稱為列舉式計算。

生態足跡的計算，即透過統計資料的數據，計算六項消費項目（i）的每人平均消費量（Ci），並且為了將生態足跡的消費轉換為統一的數值，將上述的人均消費量（Ci）除以該項目（i）的平均生產力（Pi），最後，加總六大項，即為人均生態足跡：

$$EF \text{ (gha/per)} = Ci/Pi$$

- 人均年消費量（Ci）：針對某消費項目將區域或全國總值除以總人口數，消費項目以重量為單位，通常為公斤或公噸。
- 特定項目生物平均生產力（Pi）：區域或國家的單位面積生產量（即轉換值），生產量通常以公噸為單位，面積則常以公頃為單位。
- 單一值：上述各項「生物生產力土地」可以被化約為全球公頃（global hectare, gha）。

上述的生態足跡數值是最基本的計算概念，在實際計算的過程中需要經過貿易修正與等值生產力修正，反映出：(1).全球經濟貿易往來頻繁，消費品進出口頻繁，需要「貿易修正」，(2).不同消費品的土地生產力不盡相同，例如耕

地高度集約經營因此生產力高，牧草地通常是粗放地經營因此生產力較低，因此需要「等值修正」，透過「等值因子」（Equivalent Factor, EQF）進行數據矯正。實際各項消費 (i) 計算公式詳列如圖 1（Lin et al., 2019）：

i. 耕地、牧草地、漁場和森林的生態足跡（全球公頃／人）：

$EF(i) = \frac{\text{總消費量}(i)}{\text{總人口數} \times \text{生物生產力}(i)} \times \text{等值因子}(i)$   
 總消費量為國內生產量加上進口量再減去出口量，單位皆為公噸；  
 不同消費項目的生物生產力及等值因子有所不同。

ii. 建成地的生態足跡（全球公頃／人）：

$EF = \frac{\text{建成地面積} \times \text{耕地生物生產力}}{\text{總人口數}} \times \text{等值因子}$   
 建成地面積單位為公頃。由於假設建成地皆是利用具生產力的耕地改建而成，故在計算建成地的生態足跡時假設建成地的生產力與耕地相同，因此在公式中採用耕地的生物生產力進行計算。

iii. 碳足跡（全球公頃／人）：

$EF = \frac{\text{人均碳排放量} \times (1 - \text{海洋吸收量})}{\text{固碳率}} \times \text{等值因子}$   
 人均碳排放量單位為公噸／人；海洋吸收量為海洋吸收人類活動所排放之二氧化碳的比例；固碳率單位為公噸／公頃，代表每公頃林地可吸收多少重量的碳。

$\frac{[\text{耕、牧、漁、林}] \text{生態足跡 (全球公頃/人)} = \frac{[\text{生產} + \text{進口} - \text{出口 (公噸)}] \times \text{等值因子}}{\text{生物生產力 (公噸/公頃)}}$
$\text{建成地的生態足跡 (全球公頃/人)} = \frac{\text{區域建成面積 (公頃)} \times \text{耕地生物生產力} \times \text{等值因子}}{\text{總人口數}}$
$\text{碳足跡 (全球公頃/人)} : \frac{\text{人均碳排放量 (公噸 / 人)} \times (1 - \text{海洋吸收量}) \times \text{等值因子}}{\text{固碳率 (公噸 / 公頃)}}$

資料來源：Lin et al. (2019)

圖 1、生態足跡計算公式

上述的計算公式反映出生態足跡的概念，實際計算上會考慮到 (1).列舉項目的調整，(2).相關參數包含等值因子的修正，(3).全球產量計算方式的變化(如新國家之成立)，這些因素的變化在 NFA 的年度報告中會詳細列舉說明 (Lin et al., 2016)。

(2) 生態赤字：生態足跡的供需指標

生態足跡的計算分成兩大部分，第一是消費面／需求面的「生態足跡」；第二是生產面／供給面的「生態標竿」(ecological benchmark)，生態標竿又可稱為「生物容受力」(biocapacity)。這兩個指標針對特定尺度(全球、國家或地方)，提供評估環境永續的基礎公式為：生態足跡(EF)－生態標竿(EB)＝生態赤字(ED) (圖 2) (Lee & Peng, 2014)。

生態赤字反映人類超限利用自然資源的情形，赤字的數字越大代表超限利用的情形越嚴重；反之若生態赤字小於零，便稱「生態盈餘」，即代表該地區或國家永續地利用自然資源。根據統計，全世界大約在 1970 年時由生態盈餘轉變成生態赤字 (Lin et al., 2018b)，意即人類活動的總和超過一個地球所能供給的環境涵容同化能力(又稱自淨能力)；簡言之，自 1970 年至今，我們每年都在消耗未來世代的自然資源及增加環境成本。



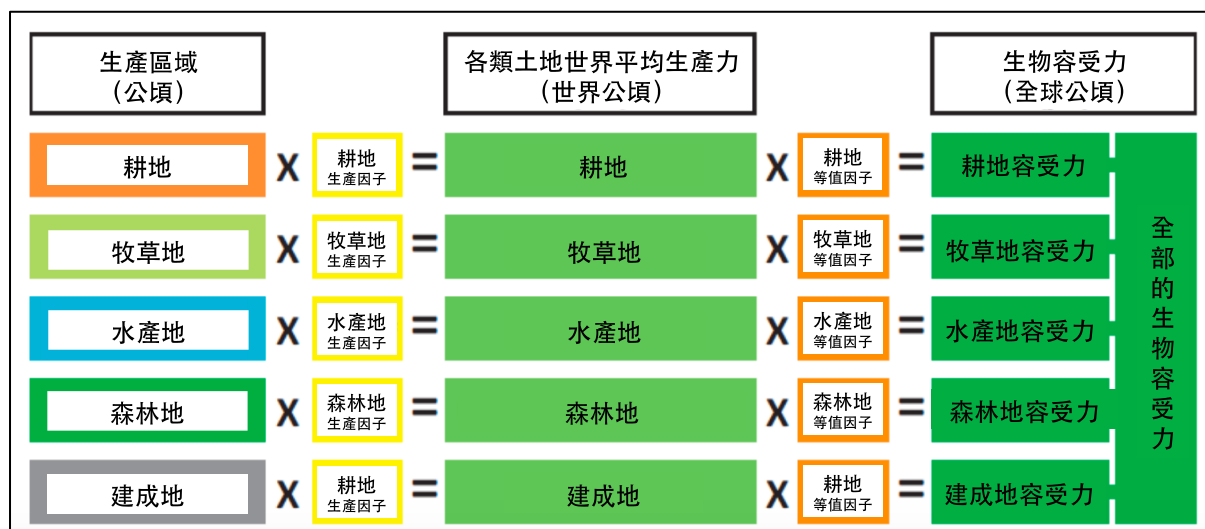
資料來源：Lee & Peng, 2014

圖 2、生態足跡、生態標竿與生態赤字之關係

生態赤字的計算進一步指向人類社會正在超限利用環境資源的具體事實，在全球尺度上，挪用子孫世代的环境資源；在國際之間，形成生態赤字國家(特別是高收入國)挪用其他國家的生態盈餘(大部分是相對收入較低的國家)；而在國內，區域間的發展不平衡，不只是經濟上的差異，更是環境資源的剝削，區域間土地利用的低度效率，形成區域發展不均的多重不正義，包含經濟與環境 (李永展，2010；李永展，2011)。

在上一小節，已經介紹生態足跡的計算方式，在此將說明如何計算「生態標竿」(或「生物容受力」)。其具體的方法是，將某生物生產力土地面積乘

上產量因子( Yield Factors, YF), 得出世界土地平均生產力後再乘上等值因子, 最後統計加總所有生物生產力土地(耕地、牧草地、海洋漁場、森林地與建成地)的面積(全球公頃), 所得之結果即為生態標竿, 或稱生物容受力(圖3)。其中產量因子的計算方式為, 將某地區或國家之特定生物生產力土地的單位面積生產量(即轉換率), 除以全球相同生物生產力土地之單位面積生產量(即全球轉換率), 所得之比值即為該地區或國家的產量因子(Lin et al. 2016)。



資料來源：Lin et al., 2018a

圖 3、生態標竿計算方式

## 第二節、國際生態足跡研究趨勢

國際生態足跡的研究進展, 主要有三個趨勢:(1). NFA 公布之年度手冊算法更新: 碳足跡吸收率之更新;(2). 長期計算生態足跡, 已成為具影響力之環境指標;(3). 混合型生態足跡, 計算地區級生態足跡的算法調整。

### 1. NFA 最新計算方式更新

國家足跡估算每兩年更新計算方式, 透過發布參考手冊與年度報告, 定期更新算法與列舉項目, Lin et al. (2018b) 回顧全球 2012 年至 2018 年之生態足跡研究, 並重點整理出這段時間生態足跡在研究方法、計算式、資料來源等方面的變革, 其中最重要的影響為 Mancini et al. (2016) 提出碳足跡計算式的更新, 而 GFN 也在 2016 年的手冊中採用新的碳足跡計算式並沿用至今。

本計畫以計算台灣生態足跡為主要研究目的, 總共有 4 項主要調整與 30 幾項細部調整, 其中碳足跡計算式的更新對全球生態足跡研究具有顯著影響,

台灣的生態足跡也不例外。圖 1 已經列出碳足跡的計算式，計算過程需要扣除一部分由海洋吸收量，意即人類活動所排放的二氧化碳由海洋吸收的比例為何，且此數值會隨著生態足跡的研究進展進行調整，Lee & Peng (2014) 計算生態足跡時所採用之海洋吸收量為 1/4，至 2020 年 GFN 將此數值調整為 28% (Lin et al., 2018b)。然而，影響最為重大的是固碳率的調整，固碳率的計算公式為  $Y_c = AFCS / 0.27$  ( $Y_c$ ：年平均每公頃林地固碳率；AFCS：森林年平均固碳量；0.27：碳及二氧化碳轉換率)，2016 年以前計算碳足跡時，AFCS 的值皆為  $0.97 \text{ t C wha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 。至 2015 年，Mancini et al. (2016) 為反應更真實的二氧化碳排放及森林固碳情形，將 AFCS 修正為  $0.73 \text{ t C wha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ，使固碳率 ( $Y_c$ ) 由 3.4 下修至 2.7。由前一小節的碳足跡計算式可知，固碳率 ( $Y_c$ ) 在計算公式中位於分母，因此固碳率的下降反而造成整體碳足跡增加。2016 年起 GFN 的手冊採用 Mancini et al. (2016) 修正的碳足跡計算方法，Lin et al. (2018b) 亦採用新的碳足跡計算方法重新計算歷年全球生態足跡，反映出碳足跡計算方式的調整對全球生態足跡數據的影響。

其他對台灣影響較少的是二氧化碳排放與邊際耕地產量因子的應用。由於每年國際能源署 (International Energy Agency, IEA) 會計算「其他二氧化碳排放」，在最新的計算方式中，將此項目「平均分給所有列入計算的國家與地區」(Lin et al., 2018b)，由於台灣排除在 NFA 的報告之外，因此不受影響。第二部分則是邊際產量因子，主要是計算貧瘠土地作物 (如高粱、小米等) 生物生產力不一致應該調整產量因子的項目，在台灣幾乎沒有土地屬於符合貧瘠土地的定義，因此不列入討論。

最後，是 30 幾項細節的項目調整，可以整理為三大重點：(1). 新的資料來源：如牧草飼料的貿易數據可以提供列舉項目的修正；(2). 錯誤修正：如魚種清單的更新，避免重複計算；(3). 等值因子更新：因為新國家成立、國境變化導致 EQF 暫時凍結。其他小變化例如採用不同的資料庫作為生態足跡資料來源，以及 GFN 定期更新的等值因子等數據，則屬於常態性的變化或不具有重大影響的調整，故不在此多做說明。

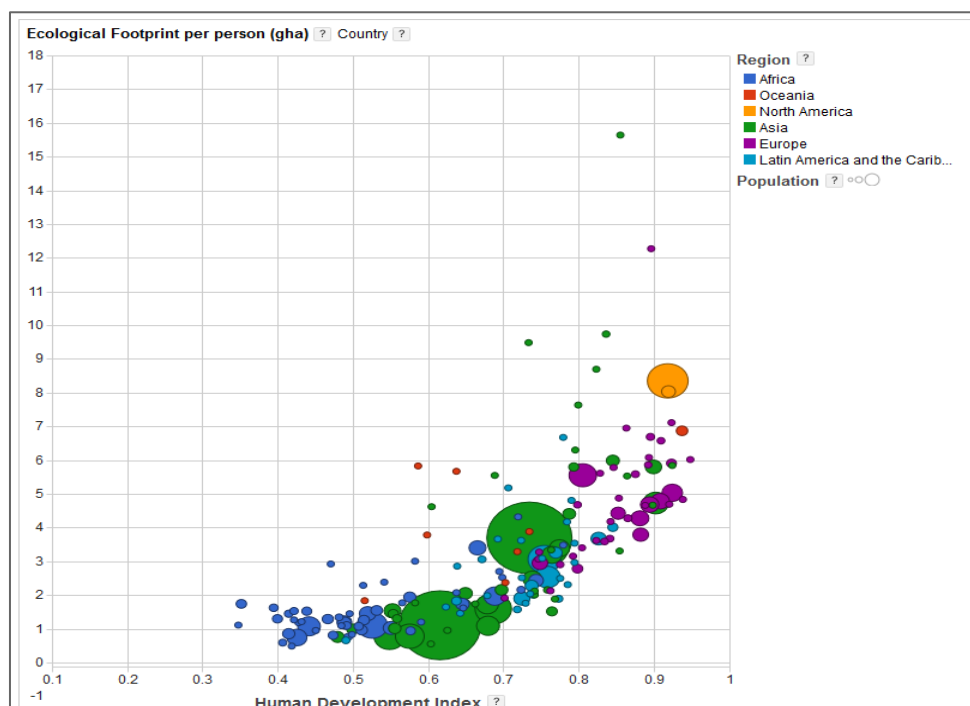
## 2. 環境永續指標：社會溝通與環境政策勾稽

由於 GFN 等機構長期追蹤全球的生態足跡，使生態足跡已經成為一有效的環境永續指標，Lin et al. (2018b) 更進一步將生態足跡與其他發展指標勾稽，

嘗試將生態足跡的研究成果與一般民眾的日常生活連結，並且作為相關環境政策的參考依據。

例如，透過國家生態足跡與國家人類發展指標（Human Development Index, HDI）的對比（圖 4），可以探問：環境永續與經濟發展、人類發展是否是個悖論？研究指出（Lin et al., 2018b），國家生態足跡總量與人類發展指數之間，呈現凸函數的關係：低足跡總量、低人類發展指數／高足跡總量、高人類發展指數。而相應的類群分佈，也與經濟發展成就呈現相同的關係。這是否意味著，幾乎沒有國家可以在生物容受力範圍內擁有高度人類發展指數？例如圖 4 將總量換成人均生態足跡，可以發現，高人類發展指數的國家相對有機會跨入全球永續發展的象限之中，而非常高的人類發展指數，則距離環境永續相當遙遠。還是可以說，人類高度的發展是藉由生態的超限利用所換取而來的？

此外，GFN 等單位亦發展其他社會溝通方式，例如以「生態超限日」（Earth Overshoot Day）指出特定地區或國家超限利用自然資源的日期，在此日期之前代表該地區仍永續利用自然資源，一旦越過超限日，代表該地區已經開始超支未來的資源，因此生態超限日越早來臨，代表該地區的消費和生活越不永續（Earth Overshoot Day, 2020）



資料來源：Lin et al., 2018b

圖 4、生態足跡與人類發展指數對照圖



### 3. 混合型生態足跡

生態足跡在 NFA 的長期追蹤下，有非常詳細的國家級計算工具與信效度很高的統計報告，在全球、國際、區域有良好的數據，卻缺乏地區級（如一座城市的都會區範圍）的計算工具，混合型生態足跡（Hybrid EF）的應用，就是為了有效計算區域級的生態足跡（Świąder et al., 2020）。

Świąder et al. (2020) 指出，傳統的生態足跡是一種由上而下的統計列舉，在地方尺度上缺乏相對應的統計資料，特別是碳足跡的類別。因此，混合型的生態足跡旨在解決這個問題，混合型生態足跡結合「傳統由上至下」生態足跡（碳足跡以外類別）以及「新型由下至上」碳足跡，藉由兩者的交叉運用，提出地區尺度的生態足跡算法。Galli et al. (2020) 亦提出發展有意義的地方性指標，不僅能真實反映地方的永續或不永續程度，另具有與全球指標溝通的效用，例如聯合國永續發展目標（Sustainable Development Goals, SDGs）等，透過地方性的生態足跡研究可以更真實地反映地方的發展是否邁向永續，又或是走向不永續發展的方向。不僅是生態足跡，生態標竿同樣具有相同的成效，兩者的特性包含綜合性評估且能監測中長期永續發展成效，相較其他指標，生態足跡的相關研究更具有社會溝通及影響政策的能力（Galli et al., 2020），而以地方的角度出發，又更能貼近社會大眾，強化社會溝通的成效，並監督地方政府的永續發展情形。

由下而上估算法的計算基礎有兩項，在學理基礎上發現碳足跡已經成為人類活動中占比最大的生態足跡項目（Lin et al., 2018b），而在實務基礎上，發現各式各樣的人類活動，在個人、社區的尺度上可以相對細緻地換算為碳排放量。因此，可以用計算其他列舉項目的方式取代碳足跡，將碳足跡的產生方式分為三大項目：食物、住房、交通。食物項目包含食物消費與剩食；住房項目包含水、電、瓦斯、污水與廢棄物處理；交通項目包含大眾運輸與私人運具的使用。上述列舉項目並不與傳統列舉項目衝突，因為這些項目是先換算為「碳足跡」，再和其他牧草地、漁場地等生態足跡混合計算，因此稱為混合型的碳足跡。

本計畫認為，混合型 EF 的創新之處在於，嘗試透過導入「新的列舉項目」，解決統計項目缺失的計算窘境，在計算的同時強化生態足跡作為一環境指標，

其尺度的應用應該跨越國家、區域的高層級，能夠形成地方級的生態足跡數據，意味著產生地方層級的環境課責可能性。

### 第三節、 國內生態足跡相關研究

由於全球足跡網絡（GFN）並未納入台灣作為生態足跡計算之地區，因此國內生態足跡估算作業主要由台灣學者進行研究與分析。相關生態足跡研究，分為兩大部分：第一，進行全國尺度之生態足跡調查與計算，以特定時段作為長時程追蹤的標的；第二，相關都市區域發展研究及經濟外部性研究等利用生態足跡作為永續發展的評估指標。

台灣的生態足跡調查方式，主要參考全球足跡網絡（GFN）與國家足跡估算（NFA）的年度報告，該報告詳述生態足跡之計算方式，並且包含算法變革，如列舉項目的調整以及平衡參數的更新等。因此，台灣生態足跡的計算方式緊隨國際趨勢，在重大算法變革時同步進行更新。台灣的全國生態足跡主要由李永展等人進行生態足跡的調查計算（李永展、陳安琪，1998a；李永展、陳安琪，1998b；李永展、吳孟芳，2005；李永展，2005b；李永展，2006；Lee & Peng, 2014；Wang et al., 2012）。自 1998 年首度計算台灣生態足跡起，已數度重新計算台灣的生態足跡，並且同步更新過往的足跡數據，迄 2020 年底為止，計有 1994 年至 2011 年之生態足跡研究；本計畫主要目的即持續更新台灣生態足跡資料至 2018 年（由於資料取得之限制）。

台灣 1998 年首度計算生態足跡，由李永展及陳安琪參考 Wackernagel & Rees (1996) 的計算方式，將生物生產力土地分為六大項（耕地、牧草地、漁產地、森林地、能源地、建成地），計算出 1996 年台灣的生態足跡為 4.67 公頃／人（李永展、陳安琪，1998b），惟該數值並未計入等值因子（EQF）的計算矯正，大幅低估足跡的數值。

李永展及其同僚於 2005 年接受農委會委託，將生態足跡之計算納入等值因子後重新計算，並且將計算年期往前溯自 1994 年，計算 1994 年至 2003 年 10 年間之生態足跡變化，研究發現生態足跡自 1994 年的每人 5.07 全球公頃成長至 2003 年的每人 5.14 全球公頃（李永展、吳孟芳，2005a；李永展，2005b）。可知納入等值因子的分析後，生態足跡數值一方面能夠確切反映不同類型土地的生物生產力差異，另一方面則顯示出先前的研究低估台灣的生態足跡，兩者數值相差約 1.25 倍左右。

由於溫室氣體排放加劇產生之全球暖化效應威脅世界永續發展，為了確實反映碳排放量的增加，嚴重增加生態足跡的數值，因此，全球足跡網絡（GFN）與國家足跡估算

(NFA) 將「碳足跡」納入「能源地」項目。李永展 (2006) 隨即重新計算 2004 年台灣之生態足跡，發現生態足跡自 5.14 全球公頃／人，大幅成長為 6.72 全球公頃／人 (其中，碳足跡佔 2.23 全球公頃／人)，此數值相當於 42 個台灣，所排放之二氧化碳需 14 個台灣才可能吸收完畢。此列舉項目改變讓台灣生態足跡大幅成長 1.3 倍左右。

至此，生態足跡不只作為一量度全球與國際之間永續發展的重要指標，其創新之列舉項目計算方法，除了在國際之間進行國家尺度的估算 (national scale)，亦可作為衡量區域之間發展的指標 (local scale)。李永展 (2006) 以區域尺度為研究方法，分析台灣縣市層級的生態足跡，研究成果顯示，消費型態、區域特性與生態足跡有顯著之關係，透過生態足跡的比較，可以得知完善的公共服務與有效的土地利用，是縮小足跡規模的重要路徑。

Wang et al. (2012) 參考李永展 (2006) 的研究方法，回溯計算 1994 年至 2007 年的生態足跡，研究結果顯示 2007 年之生態足跡為 6.54 全球公頃／人。最重要的算法變革，主要在於建成地與能源地兩個項目上，首先，由於水力發電資料取得不易，因此排除在計算之中，建成地項目僅計算建成區域；接著，能源地原先分為「消費品」與「碳足跡」兩大項目分別計算，但因消費品項目繁雜且資料變動不便於統計，因此，將消費品項目排除在能源地的計算之中；能源地項目僅計算碳排放。為了因應生態足跡計算之世界趨勢，並持續追蹤台灣生態足跡變化趨勢，李永展 (2013) 重新計算台灣的生態足跡。根據計算結果，台灣 2011 年的生態足跡為 9.43 全球公頃／人，其中，碳排放量高達 5.94 全球公頃／人，占比六成多；碳排放量造成足跡大幅成長與全球趨勢相符。



## 第三章、研究方法

本計畫採用的研究方法有三，首先以文獻回顧的方式整理國內外生態足跡相關研究的發展趨勢；其次以近年國際間生態足跡的計算方式更動為依據，調整我國生態足跡研究的計算方法；最後邀請專家學者以座談會的形式進行多向溝通，共同針對本計畫之內容進行討論，並建構及調整我國生態足跡研究的發展趨勢和未來研究方向。

### 第一節、文獻回顧法

本計畫參考李永展（2014）對生態足跡的分類方式，將我國生物生產力土地分為六類進行台灣生態足跡的計算。除此之外，本計畫蒐集自 2014 年至今國際生態足跡研究的趨勢與變動之文獻資料，並檢視國內外學者近年來在生態足跡研究上的進展，透過比對國際研究文獻和我國可取得之資料，以國際間的研究趨勢為依據，更新我國生態足跡各項目的計算方式，檢討過去生態足跡研究所得之數據，調整生態足跡相關研究之發展方向與研究方法，並藉此強化國內永續發展的概念。透過此方法，即使全球足跡網絡（GFN）等機構並未將我國相關研究納入國際資料庫，我國仍得以透過國內外生態足跡之文獻及研究資料，持續與國際接軌，不斷主動嘗試與國際對話，進行永續發展的跨國比較及經驗交流。

### 第二節、生態足跡計算分析

自 2012 年至今，除了碳足跡的計算方式有重要變動外，國際間在生態足跡的計算上並沒有進行重大的調整，仍持續沿用往年的生態足跡計算方法，如前一章節所述。本計畫所採用的碳足跡計算方式為根據 Mancini et al. (2016) 對碳足跡計算方法的修正，並以修正後的計算方法計算我國 2012 年至 2018 年之碳足跡和生態足跡資料。此外，由於 2012 年至 2018 年的漁場足跡和碳足跡各有兩種來源，前者包含糧食年報及漁業年報，後者則有能源局統計年報以及 International Energy Agency (IEA) 統計報告等來源。因此，本計畫將分析不同資料來源對生態足跡計算所造成的差異，以及分析碳足跡計算方式的異動對歷年生態足跡研究結果的影響，並透過專家學者座談統一資料來源及計算方法。生態足跡的計算為分別計算各類生物生產力土地之足跡後再進行加總，故本計畫

除了計算總和外，另分析各類生物生產力土地佔生態足跡之比例隨時間的變化，瞭解我國各類生物生產力土地足跡的變化趨勢，並與國際趨勢進行比較，在長期追蹤下得以體現我國生態足跡之演變，並持續對比國際間生態足跡的變化趨勢。

### **第三節、 專家學者座談**

本計畫共舉辦兩場專家學者座談會，邀請國內相關領域之專家學者共同討論本計畫之內容，統整我國生態足跡資料來源之取用，以及建構我國固定之生態足跡計算架構。第一場座談會著重於研討文獻及碳足跡計算方式之變動與影響，在 2020 年 10 月 14 日舉行，以利本計畫進行計算方式的修正與研究方向的調整，統一我國生態足跡計算架構，並確立生態足跡研究所採用之資料來源。第二場座談會在 2020 年 11 月 17 日舉行，邀請專家學者討論研究成果，共商未來我國生態足跡相關研究之發展方向與應用等議題，並對未來生態足跡之研究提出規劃與建議。

## 第四章、 結果與討論

本計畫之結果分為數個節次說明，第一節說明專家學者座談會討論與結果，第二節檢討 1994 年至 2011 年之生態足跡研究，並以新的研究方法重新計算。第二節又可區分為兩個段落，第一個段落為檢討 1994 年至 1999 年之生態足跡，由於缺乏該時間區段的計算資料，故僅以過去研究計算所得之生態足跡，以及比較過去與現在研究方法之差異，推估過去和現在研究方法的改變對該時間區段的生態足跡影響為何；第二個段落為檢討並使用更新後的碳足跡計算方法重新計算我國 2000 年至 2011 年之生態足跡，並比對不同的計算方法對我國生態足跡有何影響。

第三節以最新的研究方法更新我國 2012 年至 2018 年之生態足跡。此外，不同資料來源會造成計算結果不同，因此本計畫參考歷年計畫以及 Lin et al. (2019) 於 NFA 最新手冊所採用之生物生產力土地分類方式，計算 2012 年至 2018 年各項生物生產力土地之生態足跡，以及加總後之台灣整體生態足跡。第四節則計算台灣的生態標竿（生物容受力），並將生態足跡減去生態標竿以得到台灣的生態赤字，並與歷年的生態赤字趨勢進行綜合性的分析，說明台灣生態赤字的變化情形。第五節回應 Lin et al. (2018b) 提出將生態足跡研究與社會溝通勾稽，計算台灣自 1994 年至 2018 年之生態超限日，作為檢視台灣永續發展的指標之一，並冀望以此達到與一般大眾進行社會溝通的成效。

### 第一節、 專家學者座談會討論與結論

#### 1. 第一場專家學者座談會

本計畫於 2020 年 10 月 14 日舉行第一場專家學者座談會，與會人士有特有生物保育中心方國運前主任，中央研究院鄭明修研究員，國立台灣大學農業經濟學系陳郁蕙教授，以及國立台灣大學生物多樣性研究中心黃靖倫博士等人。

第一次座談會的重點為統一台灣生態足跡中漁場足跡和碳足跡的資料來源。此外，與會專家另建議本計畫應注重計算架構完整、資料來源明確、計算係數統一等，並力求以精簡明確的方式撰寫報告，以及發展符合亞洲地區和台灣生產特性的研究及計算方式（詳細資料請參閱附錄一）。

#### 2. 第二場專家學者座談會

第二場專家學者座談會於 2020 年 11 月 17 日舉行，與會人士有特有生物保育中心方國運前主任，中央研究院鄭明修研究員，國立台灣大學生物多樣性研究中心黃靖倫博士，財團法人中華經濟研究院洪志銘研究員，以及財團法人中華經濟研究院簡毓寧研究員等人。

第二次座談會討論重點為檢討本計畫之研究結果，並對社會溝通和未來研究方向提出建議，也再次強調發展符合地方地理及生產特性的研究方式。第一次座談會後，本計畫統一台灣生態足跡研究之資料來源，其中，漁場足跡的資料來源確定參考漁業署漁業統計年報，碳足跡的資料來源則參照能源局能源統計年報。第二次座談會則討論生態足跡的社會溝通方式，以生態超限日呈現，並著重於以台北市為例進行混合型生態足跡計算之初探。此外，兩次座談會皆討論未來發展具有地方特性的研究方法，也是本計畫對未來相關學術及政策發展的建議（詳細資料請參閱附錄二）。

## 第二節、 1994 年至 2011 年生態足跡研究之檢討

參照行政院農委會委託之研究計畫及李永展、陳安琪（1998b）的研究基礎，以及李永展於 2006 年及 2014 年分別進行之「台灣生態足跡趨勢之分析與比較」及「生態足跡之計算與建置」研究計畫，我國目前已計算出 1994 年至 2011 年之生態足跡。為了跟上全球生態足跡研究的腳步，本計畫參考近年來國際間生態足跡研究的趨勢及最新計算方法，分兩個部分檢討我國過去生態足跡之結果和計算方法，第一部分為 1994 年至 1999 年，第二部分為 2000 年至 2011 年。

### 1. 1994 年至 1999 年生態足跡研究結果

1994 年至 1999 年之生態足跡研究建構在李永展、陳安琪（1998b）的基礎，加入等值因子進行計算結果的修正，並參考 Wackernagel & Rees (1996) 之研究，以共四大類（糧食、住宅、運輸及消費品）及六種土地使用類型（耕地、牧草地、海洋、森林、建成地及能源地）進行全國各類生態足跡之計算。1994 年至 1999 年生態足跡計算方式採用列舉式，意即在四大類及六種土地類型之分類下共得出十種生態足跡計算項目，各別計算十種項目後再加總即為我國該年度之生態足跡。此外，當時建成地足跡的計算並未考量建成地的土地生產力，導致建成地足跡被低估，進而影響整體生態足跡。



2006 年，李永展進行「台灣生態足跡趨勢之分析與比較」研究計畫，提出 1994 年至 1999 年生態足跡計算方法的修正方向，重點內容包括：

- i. 簡化分類項目，避免重複計算。
- ii. 以耕地生物生產力作為等值因子修正建成地足跡。
- iii. 回應全球議題，以二氧化碳排放量所需之吸收地面積計算能源地足跡。

由上述計算方法的修正可以得知，1994 年至 1999 年生態足跡的計算並未將等值因子納入計算式，也未使用耕地生物生產力計算建成地足跡，此外當時採用能源地足跡，而非現在計算的碳足跡。根據李永展於 2006 年「台灣生態足跡趨勢之分析與比較」所提出的修正方向，於 2014 年的研究計畫中修正 1994 年至 1999 年的生態足跡（表 2）。其中，等值因子修正前的生態足跡單位為公頃／人，而 2014 年經等值因子轉換修正後的生態足跡單位調整為全球公頃／人。

表 2、1994 年至 1999 年等值因子修正前後之生態足跡

年份	能源地	建成地	耕地	牧草地	森林	海洋	等值因子 修正前	等值因子 修正後
1994	1.48	0.06	3.34	0.07	0.02	0.13	4.79	5.09
1995	1.46	0.06	3.41	0.06	0.02	0.13	4.81	5.04
1996	1.33	0.06	3.44	0.06	0.02	0.13	4.63	5.03
1997	1.45	0.04	4.83	0.02	0.02	0.13	4.67	6.50
1998	1.49	0.06	3.30	0.06	0.02	0.14	4.96	5.07
1999	1.42	0.06	3.32	0.07	0.02	0.47	5.00	5.35

資料來源：Lin et al., 2019

## 2. 2000 年至 2011 年

根據 2014 年「生態足跡之計算與建置」研究計畫計算我國 2000 年至 2011 年之生態足跡，與前一小節進行比較，1999 年至 2000 年我國生態足跡增加近 75%，造成生態足跡大幅增加的可能原因包括：計算方式更新、資料來源不同、土地分類項目修正等。本計畫重新檢視原始資料及計算過程發現，當年碳足跡的計算方式是造成 1999 年至 2000 年生態足跡飆升的主因。根據 Mancini et al. (2016) 所列舉之碳足跡計算式可以得知，2016 年以前全球碳足跡計算式所採

用的固碳率（ $Y_c$ ）應為 3.4，然而我國計算 2000 年至 2011 年之碳足跡時所採用之固碳率（ $Y_c$ ）為 1.8。以修正後的固碳率代入碳足跡的計算公式：

$$EF = \text{人均碳排放量} \times (1 - \text{海洋吸收率}) \times \text{等值因子} / \text{固碳率} (Y_c)$$

人均碳排放量的單位為公噸／人；海洋吸收率於 2014 年計算時為 1/4；固碳率則分別帶入 3.4 和 1.8。由於固態率的差異造成我國碳足跡增加近一倍（表 3），連帶影響我國整體生態足跡增加 2 至 3 全球公頃／人（表 4）。

表 3、2000 年至 2011 年固碳率不同對碳足跡之影響

碳足跡	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Yc=1.8	4.99	5.04	5.20	5.41	5.57	5.67
Yc=3.4	2.53	2.56	2.64	2.74	2.82	2.88
碳足跡	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Yc=1.8	5.83	5.88	5.62	5.30	5.67	5.78
Yc=3.4	2.96	2.98	2.85	2.69	2.88	2.93

表 4、2000 年至 2011 年固碳率不同對生態足跡之影響

生態足跡	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Yc=1.8	10.47	9.39	9.76	9.98	8.95	9.64
Yc=3.4	7.69	6.91	7.20	7.31	6.20	6.85
生態足跡	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Yc=1.8	9.49	9.63	9.12	8.80	9.53	9.55
Yc=3.4	6.63	6.73	6.35	6.19	6.73	6.70

由表 3 及表 4 可知，不同固碳率所得之生態足跡的差距，與不同固碳率之碳足跡的差距相同。因此，在 2000 年至 2011 年間，不同固碳率計算所得之碳足跡的差異，是造成生態足跡數據產生差異的原因，也造成該區間台灣生態足跡大幅上升，故本計畫對此進行計算及數據上的調整，將台灣 2000 年至 2011 年之碳足跡（圖 5）及生態足跡（圖 6）向下修正，以符合國際上的研究方法。

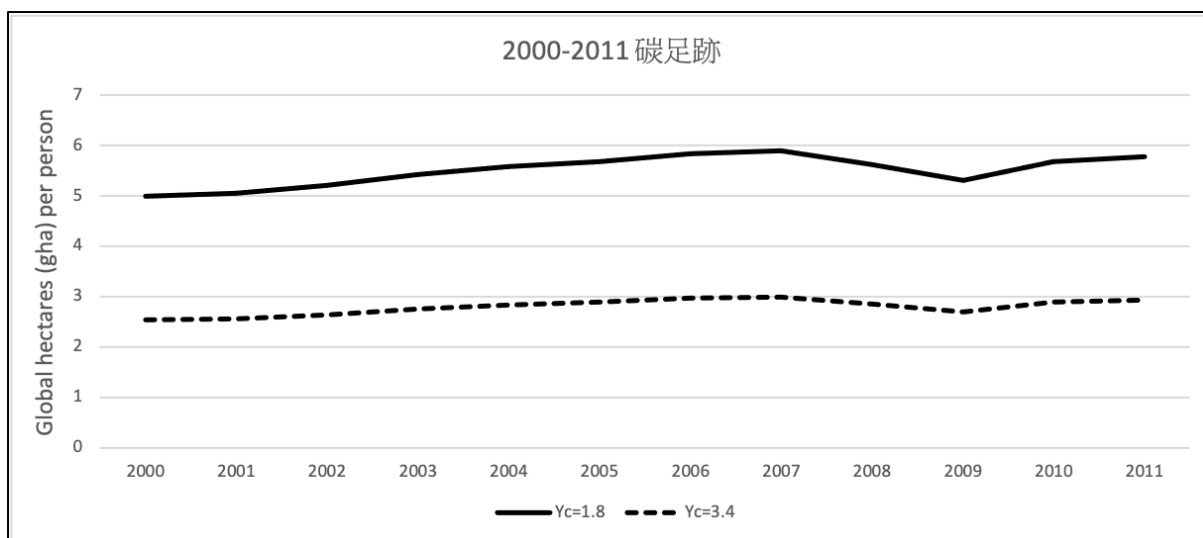


圖 5、 $Y_c=1.8$  及  $Y_c=3.4$  之 2000 年至 2011 年碳足跡

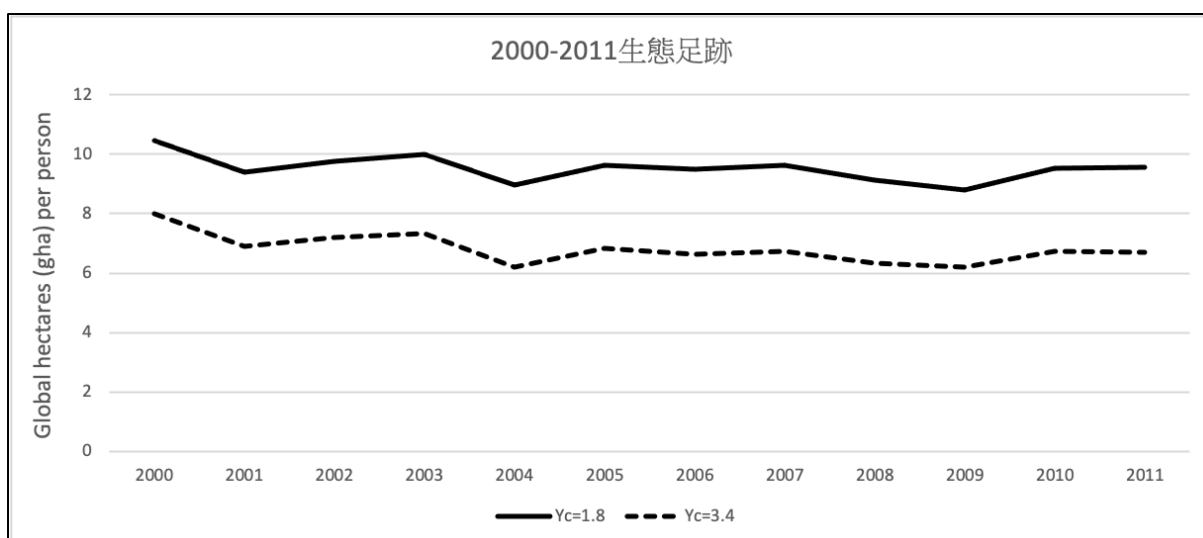


圖 6、 $Y_c=1.8$  及  $Y_c=3.4$  之 2000 年至 2011 年生態足跡

本計畫根據 GFN 於 2016 年以前所採用之碳足跡計算方法 ( $Y_c=3.4$ )，重新計算我國 2000 年至 2011 年之碳足跡，向下修正我國該時間區段之生態足跡，使我國生態足跡研究與全球趨勢具有相同的比較基準，並將修正後 2000 年至 2014 年各生物生產力土地之足跡及總生態足跡整理如下（單位：全球公頃／人）（表 5）：

表 5、2000 年至 2011 年生態足跡

（單位：全球公頃／人）

年份	耕地	牧草地	漁場	林產品	建成地	碳足跡	生態足跡
2000	4.44	0.04	0.10	0.42	0.16	2.53	7.69

2001	3.69	0.03	0.17	0.33	0.13	2.56	6.91
2002	3.86	0.04	0.17	0.37	0.12	2.64	7.20
2003	3.80	0.04	0.18	0.42	0.13	2.74	7.31
2004	2.62	0.03	0.15	0.45	0.13	2.82	6.20
2005	3.18	0.04	0.15	0.44	0.16	2.88	6.85
2006	2.99	0.04	0.15	0.34	0.15	2.96	6.63
2007	3.02	0.03	0.17	0.38	0.15	2.98	6.73
2008	2.77	0.03	0.16	0.38	0.16	2.85	6.35
2009	2.95	0.03	0.14	0.22	0.16	2.69	6.19
2010	3.10	0.03	0.14	0.39	0.19	2.88	6.73
2011	3.01	0.03	0.16	0.38	0.19	2.93	6.70

重新修正我國碳足跡後，參考 Lin et al. (2018b) 之研究結果，本計畫比較 GFN 於 2016 年前後採用之不同碳足跡計算方法（固碳率（ $Y_c$ ）=3.4，2016 年以前使用；固碳率（ $Y_c$ ）=2.7，2016 年以後使用），對我國 2000 年至 2011 年間生態足跡所造成的差異（表 6）。

表 6、固碳率不同對生態足跡之影響

（單位：全球公頃／人）

生態足跡	2000	2001	2002	2003	2004	2005
$Y_c=3.4$	7.69	6.91	7.20	7.32	6.21	6.85
$Y_c=2.7$	8.26	7.88	8.20	8.25	7.19	7.80
生態足跡	2006	2007	2008	2009	2010	2011
$Y_c=3.4$	6.62	6.74	6.35	6.19	6.73	6.71
$Y_c=2.7$	7.33	7.51	7.09	6.89	7.48	7.47

將上述計算結果以折線圖呈現（圖 7），可以發現以 Mancini et al. (2016) 及 GFN 所採用之最新碳足跡計算方法再次計算台灣 2000 年至 2011 年之生態足跡，使該區間的生態足跡又向上修正約 1 全球公頃／人。

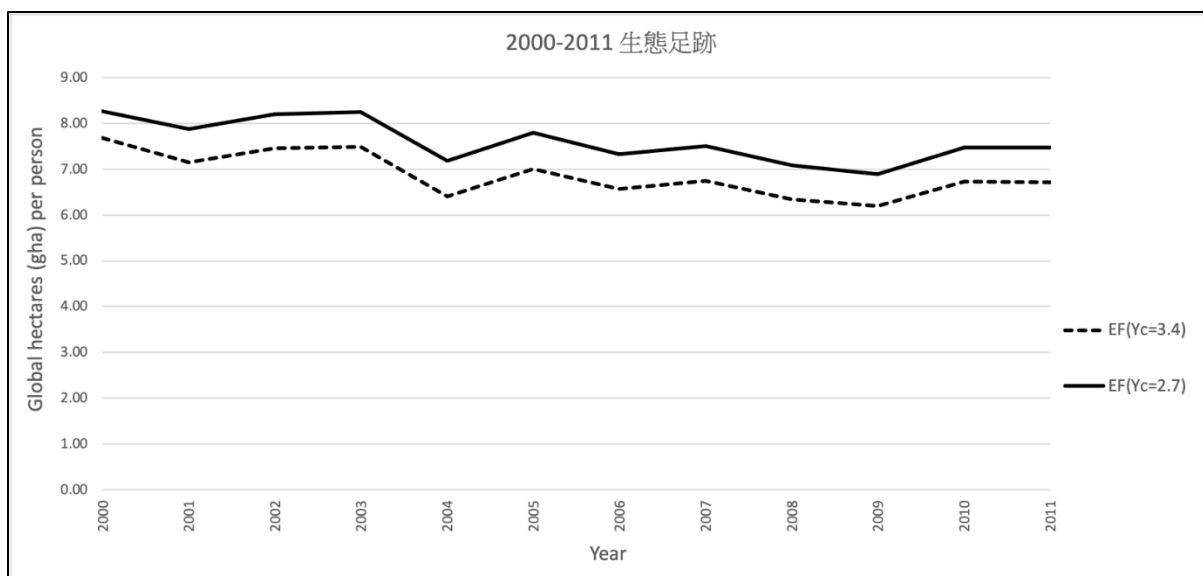


圖 7、 $Y_c=2.7$  及  $Y_c=3.4$  之 2000 年至 2011 年生態足跡

本計畫以目前全球最新之碳足跡計算式 ( $Y_c=2.7$ ) 重新計算我國 2000 年至 2011 年之碳足跡及生態足跡發現，我國碳足跡平均增加約 26%，生態足跡則平均增加約 11%。相較於全球採用新的碳足跡計算式後，碳足跡平均增加 33% 及生態足跡平均增加 17%，由此可知，碳足跡計算式的更新對我國碳足跡和生態足跡的影響皆較全球平均為低。

### 第三節、 2012 年至 2018 年生態足跡研究結果

本計畫採用 Lin et al. (2019) 之分類方法，將生態足跡分為六大類進行計算，分別為耕地、牧草地、漁場、森林、建成地和碳排放，除更新分類項目外（表 7），亦參考 NFA 的手冊更新 2012 年至 2018 年各年份之等值因子（表 8）。漁場的資料來源有兩種，不同資料來源之生產量、進口量和出口量有差異。此外，碳排放的資料來源也分為國內統計資料和 IEA 國際統計資料（表 9）。由於漁場和碳排放各有兩種資料來源，導致我國生態足跡共可計算出四種相異的結果（圖 8）。本計畫之計算方法同第二章及第三章所述，採用最新的碳足跡計算方式，分別計算各項生產力土地足跡後再進行加總，便可得知該年度的生態足跡。圖 8 以四種折線代表不同資料來源組合所得之生態足跡，「糧」代表選用糧食供需年報作為資料來源，「漁」代表漁業統計年報，「能」代表能源統計年報，「IEA」則代表世界能源統計報告。其中漁場資料來源不同所造成的差異較小，差距皆小於 0.1 全球公頃／人；反之，碳排放資料來源不同則產生較大的影響，差距約在 0.1 全球公頃／人至 0.2 全球公頃／人之間。

表 7、生態足跡計算分類項目

	土地屬性	耕地	牧草地	海洋	森林	建成地	能源地（碳足跡）
生態足跡 1994-2003	消費項目	穀類、蔬菜、水果菜、水果豬肉、家禽、油脂類、菸草類、菸草、棉花	牛肉、羊肉、乳類、羊毛	漁類	木材	居住與設施	能源電力／酒精類飲料、其他飲料、紙類礦物、人造纖維、綿絲、鋼鐵、化學工業品、塑膠、機器等械用具、寶石、精密光學儀器等
生態足跡 2004	消費項目	穀類、薯類、糖及蜂蜜、子仁及油籽類、果品類	肉類、油脂類	水產類	木材	居住與設施／水利發電設施	能源 / CO <sub>2</sub> 排放 / 鋼鐵、機器及機械用具、光學精密儀器、化學 / 工業產品、塑膠及其製品、礦物、紡織製品、飲料
	調整說明	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 比對 FAO 與農委會糧食供需年報列舉項目進行消費項目調整。</li> <li>2. 明確界定漁場範圍，並將於消費項目擴增為水產。</li> <li>3. 以耕地生物生產力調整／2004 年新增，以全球前 20 大水壩平均每公頃淹沒面積之發電量為轉換率。</li> <li>4. 以碳足跡取代消費化石能源換算重建自然資本所需土地面積／碳足跡以 IEA 之人均初級能源總消耗量計算 (TPES/POP)。</li> </ol>					
生態足跡 2004-2007	消費項目	穀類、薯類、糖及蜂蜜、子仁及油籽類、果品類	肉類、油脂類	水產類	木材	居住與設施	碳足跡／CO <sub>2</sub> 排放
	調整說明	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 水力發電因資料不易取得且來源不穩定，故刪除計算。</li> <li>2. 因消費產品列舉項目繁複不一，統計資料不穩定，且所佔生態足跡數值低，不影響最終結果，故刪除計算。</li> </ol>					

生態足跡 2008-2011	消費項目	穀類、薯類、糖及蜂蜜、子仁及油籽類、果品類	肉類、油脂類	水產類	木材	居住與設施	碳足跡／CO <sub>2</sub> 排放
	調整說明	1. 碳足跡改 IEA 之人均二氧化碳排放量計算 (CO <sub>2</sub> /POP)。 2. 全球生物產力採 2010 年之資料為計算基準。 3. 海洋吸收的碳排放量更新為 1/4。					
生態足跡 2012-2018	消費項目	穀類、薯類、糖及蜂蜜、子仁及油籽類、果品類	肉類、油脂類	水產類	木材	居住與設施	碳足跡／CO <sub>2</sub> 排放
	調整說明	1. 碳足跡以我國能源局之人均二氧化碳排放量計算 (CO <sub>2</sub> /POP)。 2. 水產類以我國漁業統計年報為資料來源。 3. 海洋碳排放吸收率更新為 28%。 4. 碳足跡計算式參考 Mancini et al. (2016) 更新之計算方法。					

表 8、等值因子

年份	耕地	牧草地	漁場	森林地	建成地	碳
2012	2.52	0.43	0.35	1.28	2.52	1.28
2013	2.52	0.43	0.35	1.28	2.52	1.28
2014	2.52	0.46	0.37	1.29	2.52	1.29
2015	2.52	0.46	0.37	1.29	2.52	1.29
2016	2.52	0.46	0.37	1.29	2.52	1.29
2017	2.52	0.46	0.37	1.29	2.52	1.29
2018	2.52	0.46	0.37	1.29	2.52	1.29

資料來源：NFA 2019 Working Guidebook

表 9、生態足跡資料來源

生物生產力土地	項目	資料來源
耕地	穀類	行政院農委會糧食供需年報(108 年)
	薯類	行政院農委會糧食供需年報(108 年)
	糖及蜂蜜	行政院農委會糧食供需年報(108 年)
	子仁及油籽類	行政院農委會糧食供需年報(108 年)
	果品類 (含蔬菜類)	行政院農委會糧食供需年報(108 年)
牧草地	肉類	行政院農委會糧食供需年報(108 年)
	油脂類	行政院農委會糧食供需年報(108 年)
漁場	水產類	行政院農委會糧食供需年報(108 年) 行政院農委會漁業署民國 108 年漁業統計年報
建成地	建成地	都市及區域發展計劃彙編查詢網
森林	林產品	行政院農委會林務局林業統計年報 109 年版
碳足跡	碳排放量	行政院經濟部能源局能源統計年報 IEA 世界能源統計報告

以下將分為六點說明六項生物生產力土地足跡的計算方法與過程：

**i. 耕地足跡**

耕地足跡共分為穀類、薯類、糖及蜂蜜、子仁及油籽類，以及果品類（含蔬菜類），首先分別計算每個消費項目（i）的生態足跡，再將所有消費項目的生態足跡加總即可求得耕地足跡。計算公式如下：

$$EF(i) = \text{總消費量}(i) / \text{總人口數} / \text{生物生產力}(i) \times \text{等值因子}(i)$$



總消費量需進行貿易修正，將國內生產量加上進口量再減去出口量，單位皆為公噸（表 10）。

表 10、2012 年至 2018 年耕地各消費項目總消費量

（單位：公噸）

年份	穀類	薯類	糖及蜂蜜	子仁及油籽類	果品類（含蔬菜類）
2012	10113648	1796830	742427	2821072	5923767
2013	9578922	1578327	653814	2557583	5935721
2014	9922621	1663587	766366	2883848	6036567
2015	9864508	1692690	760523	3201781	5852008
2016	9892984	1544286	692914	2938259	5889449
2017	10426766	1593971	785293	3082695	6359443
2018	10172765	1469524	821677	3126405	6204947

人口資料來源為「都市及區域發展統計彙編查詢網」（表 11）。

表 11、2012 年至 2018 年歷年人口數

年份	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
人口數（千萬）	2.33	2.34	2.34	2.35	2.35	2.36	2.36

生物生產力為某消費項目之全球生物生產力（轉換率），單位為每公頃可生產多少公斤之消費項目（公斤／公頃），意即將全球某消費項目(i)之總生產量(公斤)除以全球種植某消費項目(i)之面積(公頃)；資料來源為聯合國農糧組織（Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO）的統計資料庫（FAOSTAT）（表 12）。

表 12、2012 年至 2018 年耕地生物生產力

（單位：公斤／公頃）

年份	穀類	薯類	糖及蜂蜜	子仁及油籽類	果品類（含蔬菜類）
2012	1,878.85	591.51	1,343.44	501.50	1,387.74
2013	2,026.57	596.90	1,393.87	550.74	1,426.55
2014	2,062.90	616.70	1,381.42	549.18	1,459.67
2015	2,061.41	607.72	1,358.33	570.63	1,470.30
2016	2,119.64	598.83	1,354.24	583.32	1,481.24

2017	2,171.79	603.10	1,333.25	619.64	1,490.12
2018	2,130.49	598.36	1,373.29	621.83	1,516.55

等值因子不分消費項目如表 8 所示，經計算後，2012 年至 2018 年耕地足跡如表 13 所示。雖然每一年的耕地足跡有些微波動，但 2012 年至 2018 年整體仍呈現逐漸下降的趨勢，其中，2012 年至 2013 年的下降幅度最顯著，其原因及對整體生態足跡的影響將在後續說明。

表 13、2012 年至 2018 年耕地足跡

單位：（全球公頃／人）

年份	穀類	薯類	糖及蜂蜜	子仁及油籽類	果品類 (含蔬菜類)	耕地足跡
2012	0.58	0.33	0.06	0.61	0.46	2.05
2013	0.51	0.29	0.05	0.50	0.45	1.80
2014	0.52	0.29	0.06	0.57	0.45	1.88
2015	0.51	0.30	0.06	0.60	0.43	1.90
2016	0.50	0.28	0.06	0.54	0.43	1.80
2017	0.51	0.28	0.06	0.53	0.46	1.85
2018	0.51	0.26	0.06	0.54	0.44	1.81

## ii. 牧草地足跡

牧草地足跡分為肉類及油脂類，計算方式與耕地足跡相同。首先分別計算每個消費項目 (i) 的生態足跡，再將所有消費項目的生態足跡加總即可求得耕地足跡。計算公式如下：

$$EF(i) = \text{總消費量}(i) / \text{總人口數} / \text{生物生產力}(i) \times \text{等值因子}(i)$$

總消費量需進行貿易修正，將國內生產量加上進口量再減去出口量，單位皆為公噸（表 14）。

表 14、2012 年至 2018 年牧草地各消費項目總消費量

（單位：公噸）

年份	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
----	------	------	------	------	------	------	------

肉類	128747	140407	152723	148328	159713	165206	181645
油脂類	895580	911487	937208	972210	1015938	1054929	1081636

生物生產力為某消費項目之全球生物生產力（轉換率），單位為每公頃可生產多少公斤之消費項目（公斤／公頃），意即將全球某消費項目(i)之總生產量（公斤）除以全球生產某消費項目(i)所需之面積（公頃）；資料來源為聯合國農糧組織（Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO）的統計資料庫（FAOSTAT）（表 15）。

表 15、2012 年至 2018 年牧草地生物生產力

（單位：公斤／公頃）

年份	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
肉類	88.96	91.31	92.98	95.29	96.62	97.42	99.62
油脂類	219.80	223.07	230.57	234.75	238.32	241.87	245.28

歷年總人口數如表 11 所示。等值因子不分項目，統一採用牧草地等值因子，如表 8 所示。經計算後，2012 年至 2018 年牧草地足跡如表 16 所示。自 2012 年以來，每一年的牧草地足跡維持穩定些微上升，但每年增加的幅度皆小於 0.01 全球公頃／人。由於數據及佔整體生態足跡之比例都較小，故對台灣整體生態足跡的影響並不顯著。

表 16、2012 年至 2018 年牧草地足跡

（單位：全球公頃／人）

年份	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
肉類	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
油脂類	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09
牧草地足跡	0.10	0.10	0.11	0.11	0.12	0.12	0.12

### iii. 漁場足跡

漁場足跡僅有水產類一項，計算方式如同耕地足跡和牧草地足跡，先計算各消費項目(i)的生態足跡，再將所有消費項目的生態足跡加總即可

求得漁場足跡，由於漁場足跡僅有一個分類項目，故僅需計算水產類的足跡即可。計算公式如下：

$$EF(i) = \text{總消費量}(i) / \text{總人口數} / \text{生物生產力}(i) \times \text{等值因子}(i)$$

總消費量需進行貿易修正，將國內生產量加上進口量再減去出口量，單位皆為公噸（表 17）。

表 17、2012 年至 2018 年水產類總消費量

（單位：公噸）

年份	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
水產類	1136470	1034149	944571	921191	1025275	1026069	1076565

生物生產力為水產類之全球生物生產力（轉換率），單位為每公頃可生產多少公斤之水產（公斤／公頃），意即將全球水產類之總生產量（公斤）除以全球漁場總面積（公頃）；資料來源為聯合國農糧組織（Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO）的統計資料庫（FAOSTAT）（表 18）。

表 18、2012 年至 2018 年漁場足跡之世界生物生產力

（單位：公斤／公頃）

年份	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
水產類	82.11	84.58	86.79	88.79	87.42	90.89	93.95

歷年總人口數如表 11 所示，並採用漁場足跡之等值因子，如表 8 所示。經計算後，2012 年至 2018 年漁場足跡如表 19 所示。漁場足跡在 2012 年至 2015 年些微下降後，至 2016 年又些微上升，之後至 2018 年皆維持穩定，且上升及下降的幅度皆不超過 0.01 全球公頃／人。由於漁場足跡之數值及佔整體生態足跡之比例都較小，故對台灣整體生態足跡的影響並不顯著。

表 19、2012 年至 2018 年漁場足跡

（單位：全球公頃／人）

年份	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018

漁場足跡	0.21	0.18	0.17	0.16	0.18	0.18	0.18
------	------	------	------	------	------	------	------

#### iv. 森林（林產品）足跡

森林足跡的計算方式如同前述三項足跡，先計算各消費項目（i）的生態足跡，再將所有消費項目的生態足跡加總即可求得漁場足跡。森林足跡的消費項目即為生產之木材材積，故僅需計算木材（林產品）的足跡即可。計算公式如下：

$$EF(i) = \text{總消費量}(i) / \text{總人口數} / \text{生物生產力}(i) \times \text{等值因子}(i)$$

總消費量需進行貿易修正，將國內生產量加上進口量再減去出口量，計算木材材積的單位為千立方公尺（表 20）。

表 20、2012 年至 2018 年木材總消費量

（單位：千立方公尺）

年份	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
木材	5762534	5297191	5689960	5366925	4647636	4272313	4768534

生物生產力為某消費項目之全球生物生產力（轉換率），單位為每公頃可生產多少體積之木材（立方公尺／公頃），意即將全球木材總生產量（立方公尺）除以全球生產木材所需之面積（公頃）；資料來源為聯合國農糧組織（Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO）的統計資料庫（FAOSTAT）（表 21）。

表 21、2012 年至 2018 年森林世界生物生產力

（單位：立方公尺／公頃）

年份	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
林產品	0.91	0.92	0.93	0.92	0.95	0.95	0.99

歷年總人口數如表 11 所示，並採用森林地等值因子，如表 8 所示。經計算後，2012 年至 2018 年森林（林產品）足跡如表 22 所示。森林足跡自 2012 年起緩慢下降，每年下降 0.01 全球公頃／人至 0.05 全球公頃／

人，一直到 2017 年至 2018 年時才又些微上升。由於森林足跡之數值及佔整體生態足跡之比例都較小，故對台灣生態足跡的影響並不顯著。

表 22、2012 年至 2018 年森林（林產品）足跡

（單位：全球公頃／人）

年份	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
森林足跡	0.35	0.32	0.34	0.32	0.27	0.25	0.27

#### v. 建成地足跡

建成地足跡的計算方式較為特殊，在生態足跡的計算中假設建成地是由耕地改建而成，故假設所有建成地皆具有與耕地相同的生產力，因此建成地的生物生產力與等值因子皆與耕地相同。因此，僅需另外統計建成地的面積即可計算建成地足跡。計算公式如下：

$$EF = \text{建成地面積} \times \text{耕地生物生產力} / \text{總人口數} \times \text{等值因子}$$

建成地面積以公頃為單位，又可分為都市計畫及非都市計畫用地，兩種用地又可細分為多種目的之建成地分類（表 23）。

表 23、2012 年至 2018 年建成地面積

單位：公頃

年份	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
都市計畫	186007.7	186853.1	188559.9	186275.7	187342.5	187773.0	187532.2
住宅區	64043.1	65153.4	65314.4	64993.2	64690.7	64722.6	64935.7
商業區	7924.6	7939.3	7932.5	8016.3	8020.8	8043.1	8143.6
工業區	22384.6	21877.6	21771.1	21039.1	21540.1	21496.0	21453.5
公共設施	91655.3	91882.8	93541.8	92227.2	93091.0	93511.3	92999.4
非都市計畫	159664.9	160201.2	160381.7	160843.1	161354.9	162067.4	162920.3
建築用地	63945.0	64025.0	64127.1	64270.7	64418.9	64561.7	64776.5
特定目的	46063.4	46181.8	46080.8	46095.7	46092.4	46238.0	46470.1
交通	43075.7	43424.1	43689.7	43970.7	44299.0	44687.6	45034.3

遊憩	6342.7	6327.7	6244.3	6267.5	6306.6	6343.0	6402.3
窯業	238.1	242.7	239.9	238.5	238.1	237.0	237.1
總計	345672.5	347054.2	348941.5	347118.7	348697.4	349840.3	350452.5

資料來源：本計畫根據都市及區域發展統計彙編網站資料計算而得

如同前述，生態足跡的計算中假設建成地的生物生產力及等值因子皆與耕地相同，故在此不再重複列出耕地的生物生產力及等值因子。經計算後所得之建成地足跡如表 24 所示。自 2012 年至今，建成地足跡維持穩定，並未出現任何上下波動的情形，也是計算台灣生態足跡時唯一一項沒有變化的生物生產力土地足跡。

表 24、2012 年至 2018 年建成地足跡

(單位：全球公頃／人)

年份	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
建成地足跡	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19

#### vi. 碳足跡

碳足跡的計算以人均碳排放量為基礎，考量海洋對二氧化碳的吸收能力，再以固碳率將二氧化碳轉換為碳元素。碳足跡代表需要多少面積的土地吸收人類活動所排放的二氧化碳，而具有吸收二氧化碳能力的土地即為森林地。因此，計算生態足跡時需將碳足跡獨立計算以了解人類活動的碳排放量，但在計算生態標竿由於與森林地足跡共用相同的土地，故不重複計算，此部分會在後文繼續說明。碳足跡的計算式如下：

$$EF = \text{人均碳排放量} \times (1 - \text{海洋吸收率}) / \text{固碳率} \times \text{等值因子}$$

人均碳排放量之單位為公噸／人，資料來源包含台灣能源局的能源統計年報和 IEA 的世界能源統計報告。為求原始資料及貼近真實社會情況，並經專家學者座談會討論，本計畫決議採用台灣能源局的能源統計年報作為碳足跡的資料來源（表 25）。

表 25、2012 年至 2018 年人均碳排放量

(單位：公噸／人)

年份	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
人均碳排放量	10.88	10.88	11.04	11.02	11.18	11.44	11.33

海洋吸收率代表海洋吸收人類活動排放之二氧化碳總量的比例，根據 Lin et al. (2019) 所採用之最新海洋吸收率為 0.281；固碳率單位為公噸／公頃，代表每公頃的森林地可以固定多少重量的碳，本計畫以 Mancini et al. (2016) 更新之  $Y_c = 2.7$  進行計算；等值因子如表 4 所示。經計算後所得之碳足跡如表 26 所示，自 2012 年起，碳足跡每年持續上升，至 2018 年才出現些微的下降。由於碳足跡佔整體生態足跡的比例已超過 60%，故碳足跡的變動將會對台灣的生態足跡造成顯著的影響。

表 26、2012 年至 2018 年碳足跡

(單位：全球公頃／人)

年份	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
碳足跡	3.71	3.71	3.79	3.79	3.84	3.93	3.89

表 27 列出台灣 2012 年至 2018 年不同資料來源所計算之生態足跡，並從圖 8 可以看出，雖然不同資料來源會產生四種計算結果，但每一種計算結果的生態足跡變化趨勢皆相同。然而，由於計算結果會影響台灣生態足跡的呈現，也會影響生態赤字等其他永續發展指標，為了統一參考資料來源以呈現研究結果，並作為未來生態足跡研究的資料來源依據，經專家學者座談會討論後決議，漁場足跡採用漁業統計年報，碳足跡則採用我國能源局能源統計年報。由於糧食供需年報的資料是由漁業統計年報提供，而 IEA 的世界能源統計報告亦是由我國能源局提供資料，因此可能發生未呈現完整原始資料的情形。為求資料的原始性以及完整性，本計畫決定採用最貼近原始資料的資料來源，並且囊括最多項目，盡量反映第一手資料及其完整性，使研究結果更貼近現實情況。

表 27、2012 年至 2018 年不同資料來源所得之生態足跡

(單位：全球公頃／人)

年份	糧+能	糧+IEA	漁+能	漁+IEA
2012	6.57	6.40	6.61	6.44
2013	6.27	6.10	6.30	6.13



2014	6.47	6.32	6.48	6.33
2015	6.44	6.29	6.47	6.33
2016	6.32	6.19	6.40	6.26
2017	6.44	6.29	6.51	6.36
2018	6.41	6.22	6.46	6.28

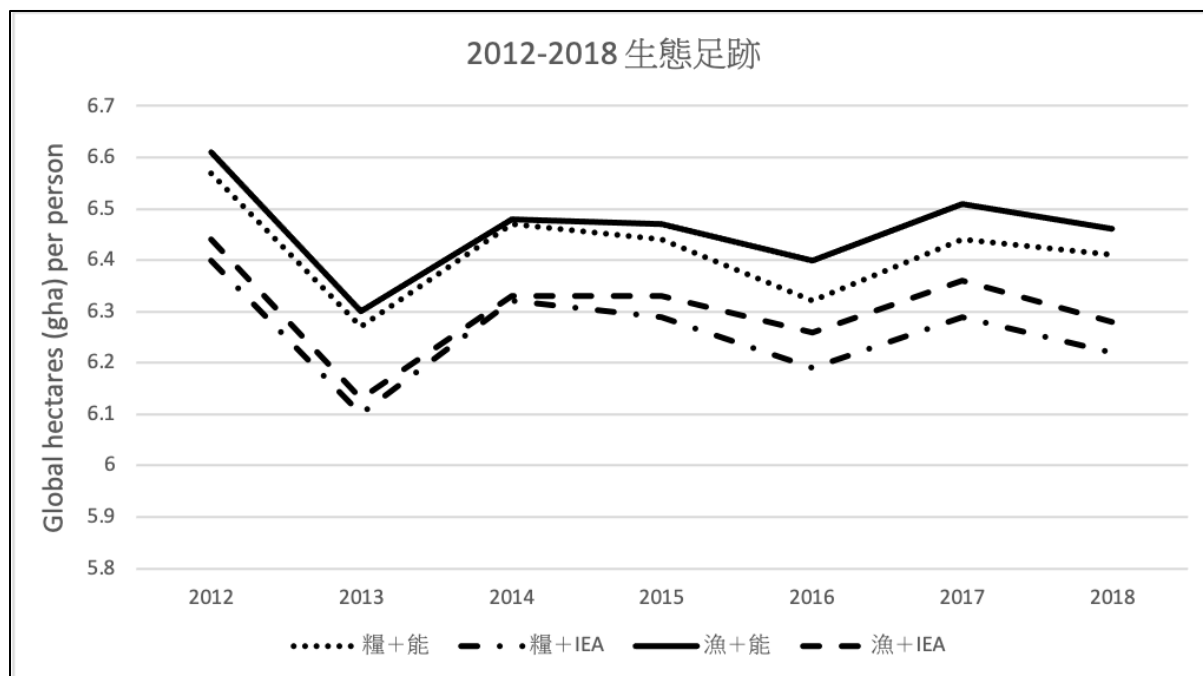


圖 8、台灣 2012 年至 2018 年生態足跡變化

資料來源統一後所得之 2012 年至 2018 年生態足跡如表 28 所示。我國自 2012 年至 2018 年之生態足跡呈現穩定至緩慢下降的趨勢，其中 2013 年出現較為明顯的下降（圖 9）。檢視數據資料發現，造成 2013 年生態足跡較其他年份為低的原因是耕地足跡下降，包括國內生產量和出口量皆偏低。由於該年並未發生世界級或國家級足以影響糧食生產和進出口的事件，故本計畫轉向探討是否因天災造成 2013 年耕地足跡的下降。據交通部中央氣象局統計資料，2012 年至 2018 年之間有發佈颱風警報的颱風數量，以 2013 年的 9 個颱風為近十年來最多的一次。因此，本計畫認為，有可能是因為颱風數量造成該年耕地生產量偏低，進而影響該年耕地足跡，使 2013 年的生態足跡明顯較其他年份為低，才會在折線圖中出現坡谷的情況。

表 28、2012 年至 2018 年台灣生態足跡與生物生產力土地足跡

(單位：全球公頃／人)

	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018

耕地	2.05	1.79	1.88	1.90	1.80	1.85	1.81
牧草地	0.10	0.10	0.11	0.11	0.12	0.12	0.12
漁場	0.21	0.18	0.17	0.16	0.18	0.18	0.18
林產品	0.35	0.32	0.34	0.32	0.27	0.25	0.27
建成地	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19
碳足跡	3.71	3.71	3.79	3.79	3.84	3.93	3.89
生態足跡	6.61	6.30	6.48	6.47	6.40	6.51	6.46

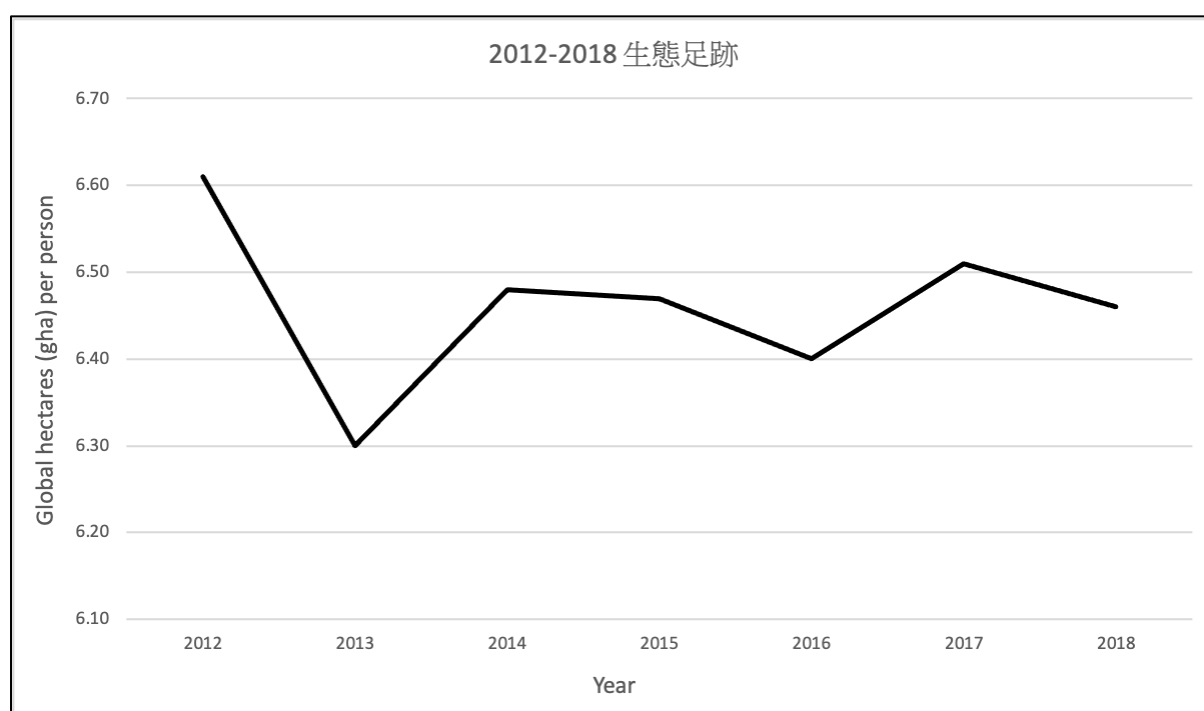


圖 9、台灣 2012 年至 2018 年生態足跡變化（統一資料來源）

檢視我國 2012 年至 2018 年整體生態足跡趨勢後，將各項足跡分開檢視（見圖 10），可以發現該時間區間內以碳足跡及耕地足跡所佔比例較高，對生態足跡影響也相對較大，其中又以碳足跡最顯著，其餘四個項目的足跡皆小於 0.5 全球公頃／人。與圖 9 進行對比並呼應前述，可以發現 2013 年耕地足跡明顯偏低，雖然 2016 年及 2018 年耕地足跡亦有較低的趨勢，但由於碳足跡的持續增加使該兩年整體生態足跡下降的情形並不顯著。此外，自 2012 年至 2018 年我國生態足跡趨於穩定至緩慢下降，其中以耕地足跡下降的趨勢較明顯，但碳足跡卻反而呈現持續上升的趨勢，在全球重視碳排放議題並倡導減碳

的現在，我國碳足跡不減反增，該如何強調減碳的重要性並實際達成減碳的目標，是我國未來相關能源及環境政策必須重點努力的部分。

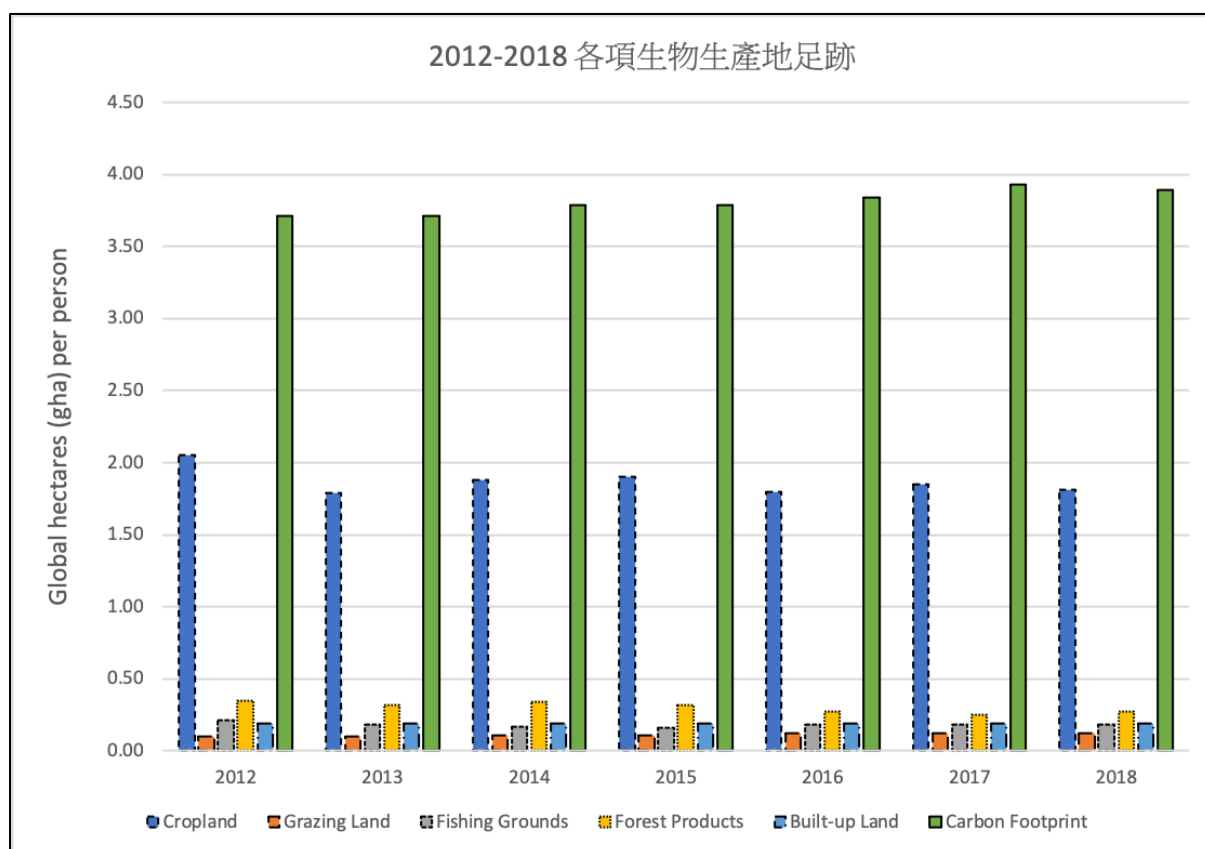


圖 10、台灣 2012 年至 2018 年各項足跡之變化

將各項足跡歷年的變化趨勢以圖表方式呈現(圖 11)，可知碳足跡是我國生態足跡的主要來源，其次為耕地足跡。自 2012 年至 2018 年，各項足跡並無顯著的變化，反映出整體生態足跡呈現穩定的狀態，其中耕地足跡約維持在 1.5 至 2.0 全球公頃／人之間，碳足跡也大約落在 4.5 全球公頃／人左右。檢視各項足跡所佔比例(圖 12)，耕地足跡所佔比例約維持在 20%，而碳足跡則占據我國生態足跡 70% 的比例，且所佔比例仍持續在增加當中，至 2018 年已些微超過 70%；其他四項足跡所佔比例低且沒有明顯變化。

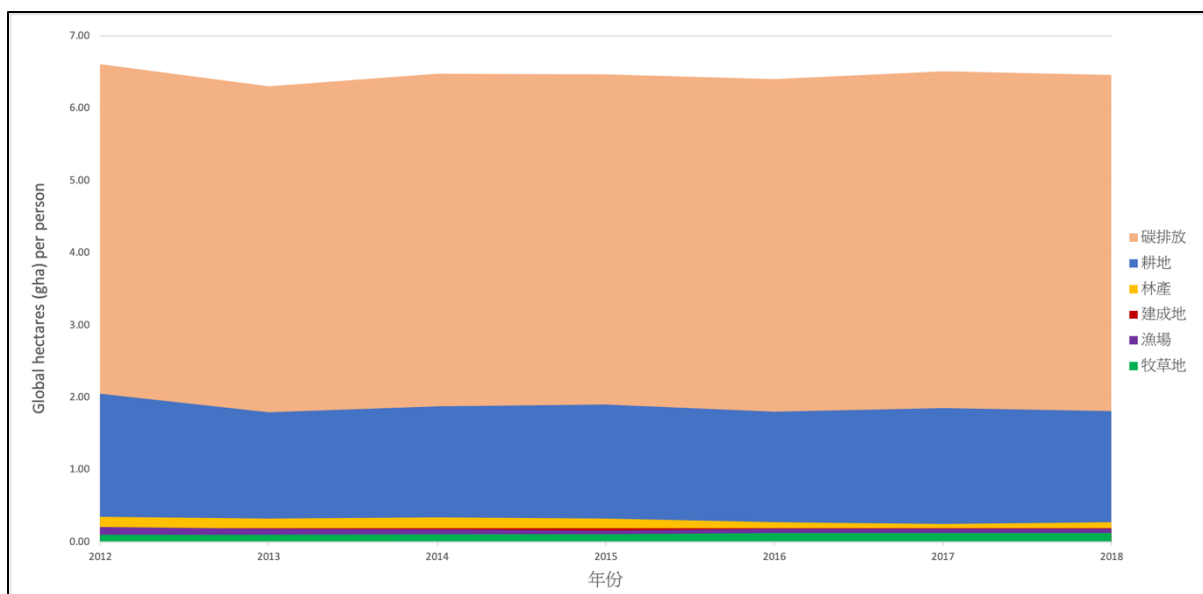


圖 11、台灣 2012 年至 2018 年各項足跡變化趨勢

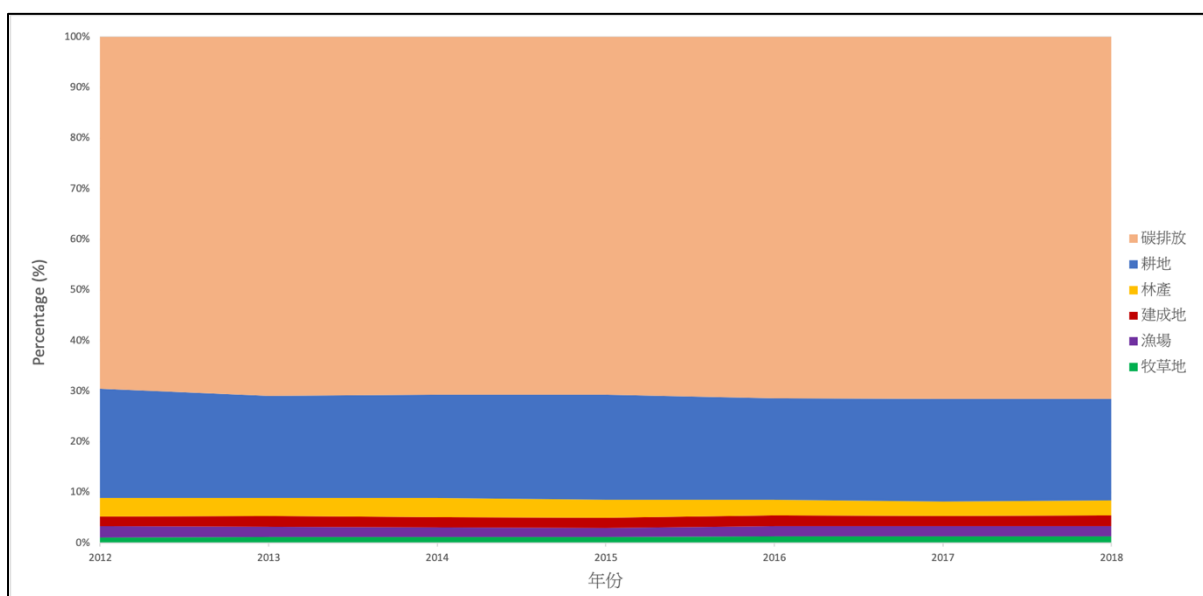


圖 12、台灣 2012 年至 2018 年各項足跡比例變化

#### 第四節、生態赤字

本節討論我國生態足跡與全球趨勢的比較，包括生態足跡和生態標竿的變化趨勢，以及各項足跡的歷年趨勢和比例變化。前一節已經說明我國生態足跡的計算過程及研究結果，故本節將先說明生態標竿的計算，再結合生態足跡以分析台灣的生態赤字。

生態標竿（生物容受力）的計算公式如下：

$$\text{生態標竿} = \text{生物生產力土地面積} \times \text{生產因子} \times \text{等值因子}$$

由於生態足跡是以人均生態足跡呈現，故計算出生態標竿後也應除以台灣總人口數，得出台灣人均生態標竿，才能與生態足跡進行計算及討論。計算公式修正如下：

$$\text{人均生態標竿} = \text{生物生產力土地面積} \times \text{生產因子} \times \text{等值因子} / \text{總人口數}$$

生物生產力土地面積的資料來源為農業統計年報，除建成地面積的資料來源為都市及區域發展統計彙編查詢網；生產因子代表某地區特定消費項目(i)之生物生產力與全球生物生產力之比較，又可以特定消費項目(i)於某地區之生物生產力與全球生物生產力的比值呈現，以本計畫為例，便是以台灣的生物生產力(轉換率)除以全球生物生產力(全球轉換率)，即可求得台灣某生物生產力土地的生產因子；等值因子與總人口數皆與生態足跡之資料來源相同，請參照上一節之內容。經計算後各項生物生產力土地之人均生態標竿，以及台灣人均生態標竿如表 29 所示。

表 29、2012 年至 2018 年台灣生態標竿 (生物容受力)

(單位：全球公頃/人)

年份	耕地	牧草地	漁場	林地	建成地	生態標竿
2012	0.77	0.07	0.23	0.00	0.33	1.40
2013	0.71	0.07	0.23	0.00	0.31	1.32
2014	0.73	0.07	0.26	0.00	0.32	1.38
2015	0.70	0.07	0.23	0.00	0.30	1.30
2016	0.67	0.07	0.18	0.00	0.29	1.21
2017	0.71	0.07	0.18	0.00	0.31	1.27
2018	0.71	0.07	0.18	0.00	0.32	1.28

自 2012 年至 2018 年，台灣的生態標竿持續減少，意即台灣的生物生產力土地所能提供的資源越來越少。為進一步了解台灣對自然資源利用的永續程度，本計畫將生態足

跡減去生態標竿，所得之差即為生態赤字，生態赤字越高代表台灣超限利用自然資源的情形越嚴重，也就是離永續發展越趨遙遠（表 30）。

表 30、2012 年至 2018 年台灣生態赤字變化

年份	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
生態標竿	1.40	1.32	1.38	1.31	1.22	1.27	1.29
生態足跡	6.61	6.30	6.48	6.47	6.40	6.51	6.46
生態赤字	5.21	4.98	5.10	5.16	5.18	5.24	5.17

雖然台灣的生態足跡自 2012 年至 2018 年大略保持穩定，生態標竿卻持續下降，造成台灣生態赤字持續上升。結合李永展（2014）的研究結果，將台灣自 1994 年至 2018 年之生態足跡、生態標竿和生態赤字變化呈現如表 31，可以更為明顯地看出台灣生態赤字隨時間的演變。自 1994 年至 2018 年，台灣的生態標竿持續減少，且生態足跡與生態標竿之間的差距持續擴大，反映出台灣的生態赤字仍在持續增加（圖 13）。

表 31、1994 年至 2018 年台灣生態赤字變化

（單位：全球公頃／人）

年份	1994	1995	1996	1997	1998	1999
生態標竿	2.25	2.09	2.09	2.09	2.09	2.09
生態足跡	5.09	5.04	5.03	6.50	5.07	5.35
生態赤字	2.84	2.95	2.94	4.41	2.98	3.26
年份	2000	2001	2002	2003	2004	2005
生態標竿	1.95	1.95	1.95	1.95	1.95	1.83
生態足跡	7.69	7.15	7.45	7.49	6.41	7.01
生態赤字	5.74	5.20	5.5	5.54	4.46	5.18
年份	2006	2007	2008	2009	2010	2011
生態標竿	1.81	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78
生態足跡	6.57	6.74	6.35	6.19	6.73	6.71
生態赤字	4.76	4.96	4.57	4.41	4.95	4.93
年份	2012	2013	2014	2015	2016	2017
生態標竿	1.40	1.32	1.38	1.31	1.22	1.27
生態足跡	6.61	6.30	6.48	6.47	6.40	6.51
生態赤字	5.21	4.98	5.10	5.16	5.18	5.24
年份	2018					
生態標竿	1.29					
生態足跡	6.46					
生態赤字	5.17					

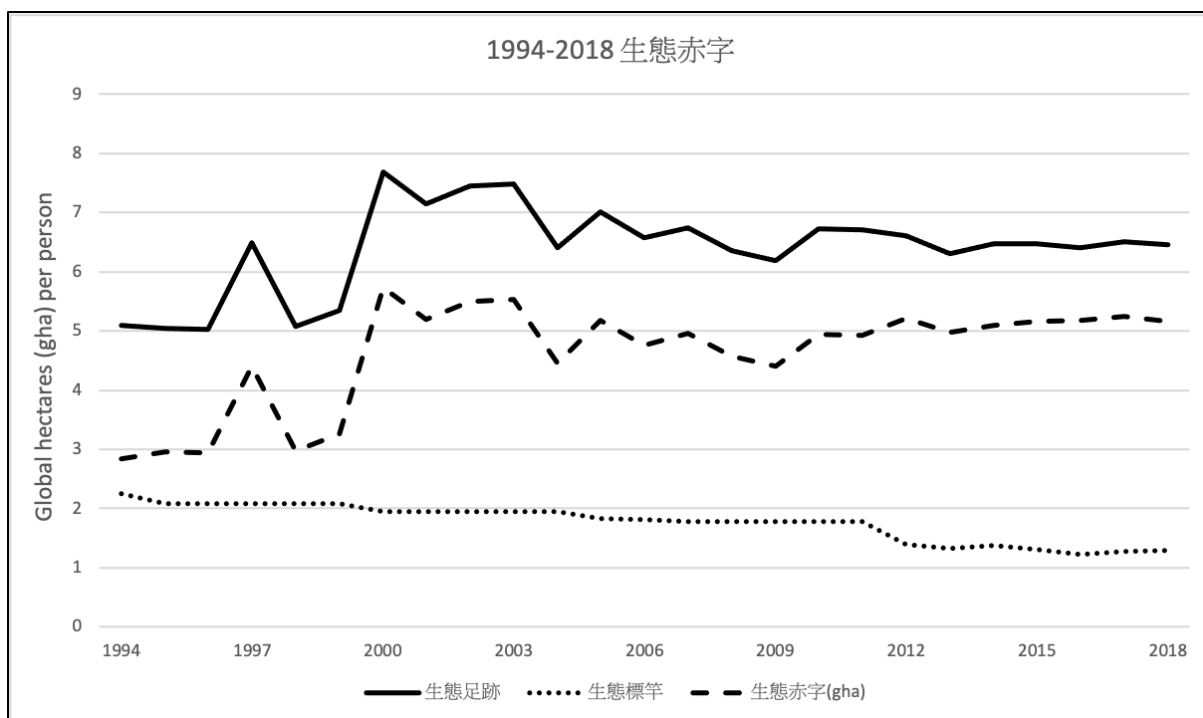
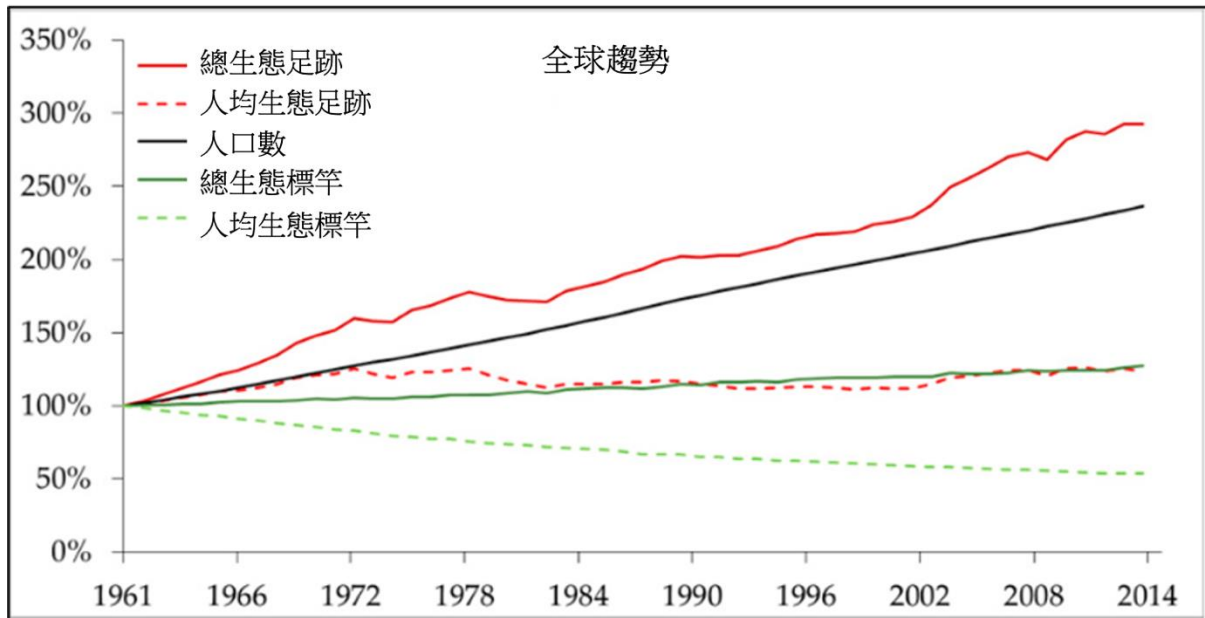


圖 13、台灣 1994 年至 2018 年生態足跡、生態標準、生態赤字變化趨勢

我國的生態足跡和生態標準變化趨勢與 Lin et al. (2018b) 在研究中指出的全球趨勢幾乎一致。國際間的人均生態足跡近年來皆保持穩定，但人均生物容受力（即本計畫所指稱之生態標準）卻持續下降。根據 Lin et al. (2018b) 的解釋，造成現今趨勢的主要原因為全球人口增加，由於全球資源有限，故隨著世界人口的持續增長，人均能使用的資源就會越來越少，即使近年來人均消耗的資源量趨於穩定甚至有緩慢減少的趨勢，但仍舊比不上全球人口增加所造成的影響（見圖 14）。其中重要影響因素為自 1980 年代起中國人口的大量增加（Galli et al., 2012），不僅影響東亞和太平洋島國的人均生態足跡和人均可用資源，時至今日仍持續地影響世界生態足跡趨勢的變動。

反觀我國，自 2012 年至 2018 年人口增加約三十四萬人，人口成長率約為 0.01%，生態赤字則上升約 0.05%，因此可得知，我國生態赤字上升的主要原因與國際趨勢不同，台灣生態赤字持續增加的主要原因並不是人口成長。台灣生態赤字持續增加，且根據研究結果顯示並非由人口成長所導致，更加反映出台灣不永續利用自然資源的情形。

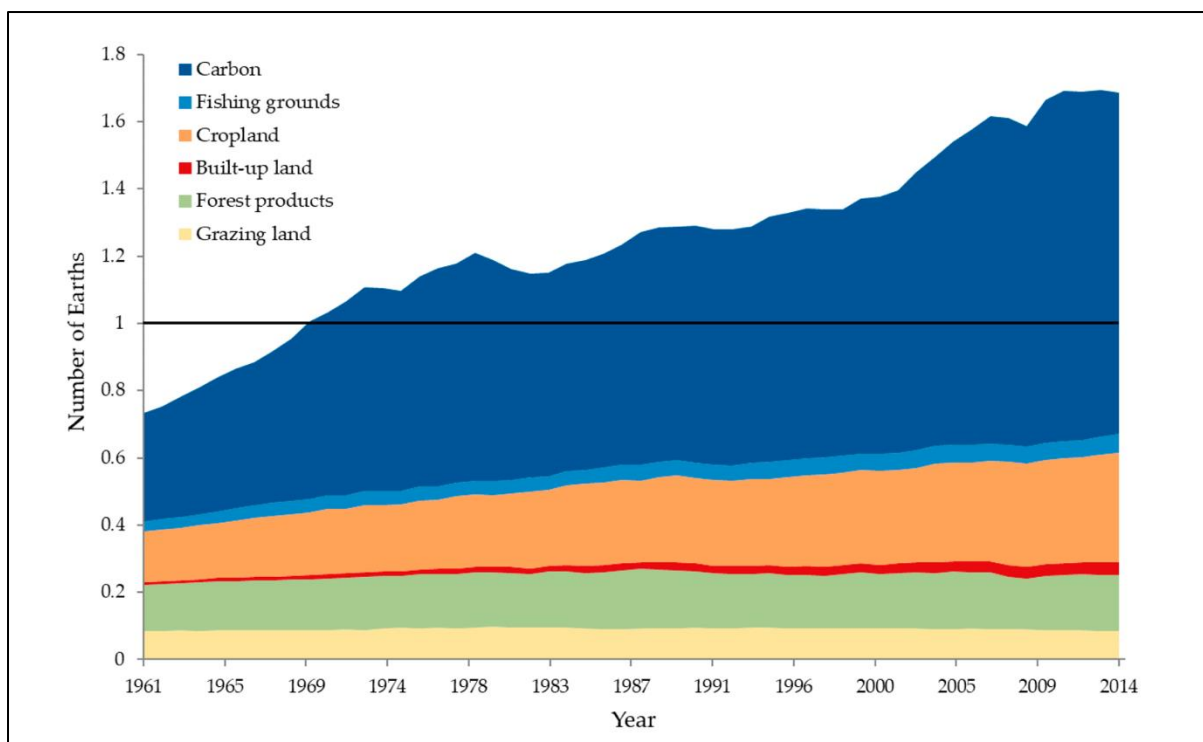


資料來源：Lin et al., 2018b

圖 14、全球生態足跡、生物容受力及人口數變化趨勢

與全球趨勢相比較，雖然 Lin et al. (2018b) 以地球數量為單位（圖 15），而非生態足跡常用的人均全球公頃（gha/per），但本計畫著重於趨勢的比較，故單位不同並不會造成影響。現今碳足跡佔全球生態足跡約 60% 的比例，相較於 1961 年碳足跡只佔 44%，甚至約 150 年前碳足跡只佔 1%（Lin et al., 2018b），碳足跡在近百年內增加的幅度非常可觀。全球足跡比例佔第二高的為耕地足跡，第三為林產品，再來則是牧草地。將我國各項足跡比例與全球趨勢相比，我國碳足跡佔生態足跡比例較全球碳足跡佔生態足跡比例高出 10%，表示我國碳排放量相較於全球平均為高，在全球強調減碳的趨勢下，我國未來需要針對碳排放的部分進行重點檢討和改善。



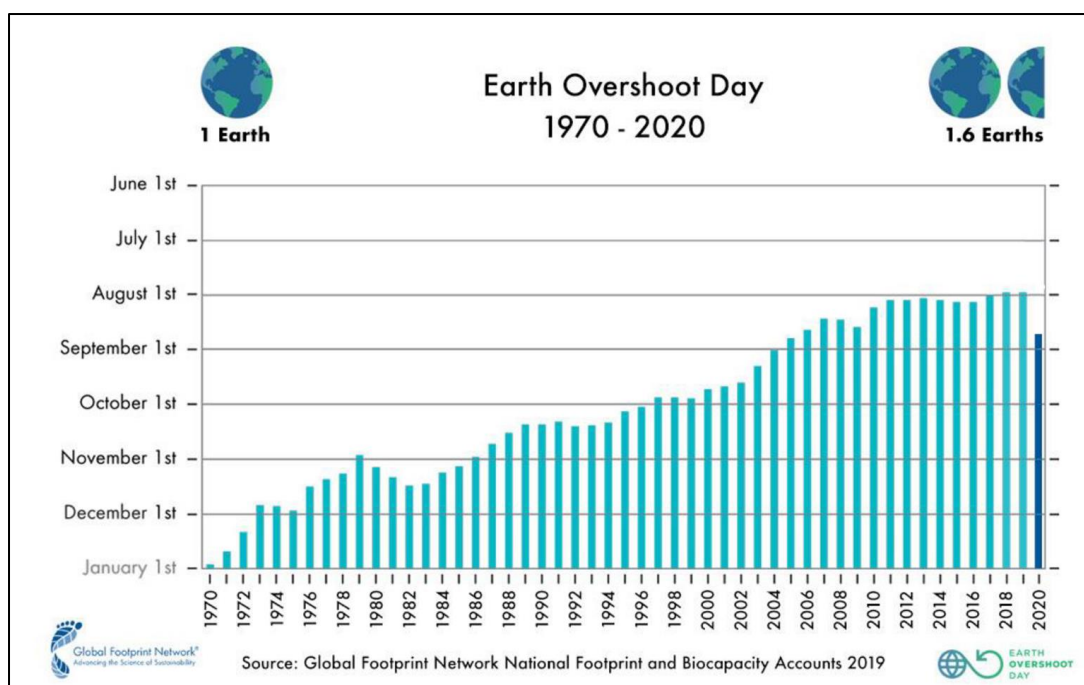


資料來源：Lin et al., 2018b

圖 15、全球各項足跡變化趨勢

## 第五節、生態超限日

生態超限日（Overshoot Day）是呈現生態赤字的一種方式，代表人類在一年之中多快消耗完地球該年所能提供的自然資源（Earth Overshoot Day, 2020）；易言之，自超限日起，之後的每一天人類都在超支未來地球所能提供給我們的自然資源。根據 GFN 的網站資料，2020 年地球生態超限日（Earth Overshoot Day）落在 8 月 22 日，意即全球在 8 月 22 日這天將會消耗完地球一整年所能提供給人類的自然資源，這一年剩下的日子都將超支未來的資源。自 1970 年至今，全球的生態超限日不斷提前（圖 16），也就是說人類將地球的自然資源消耗殆盡的速率越來越快，超支自然資源的情形也越來越嚴重。2020 年受到疫情影響，成為近十年來生態超限日最晚的一年，比原先預估的日期晚了將近兩週。換句話說，疫情反而減少人類對自然資源的消耗，使自然資源得到一些喘息的機會。



資料來源: Earth Overshoot Day, 2020

圖 16、歷年地球生態超限日

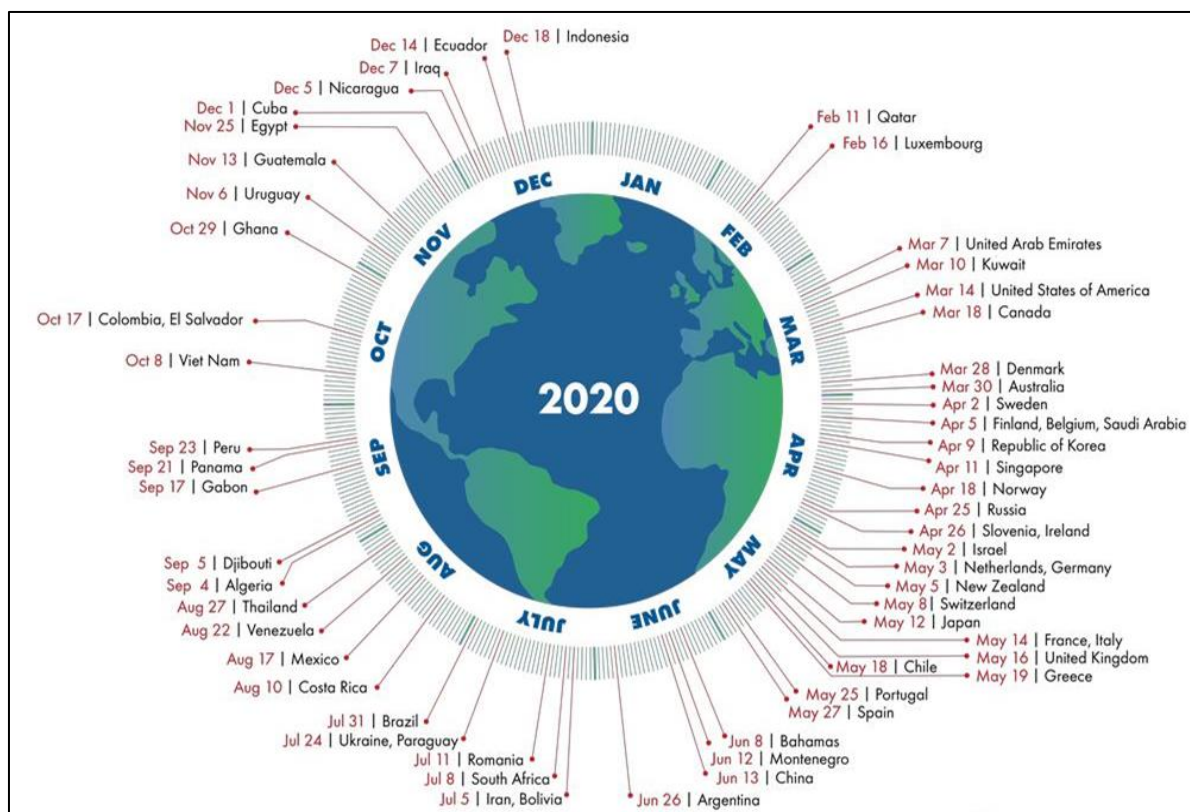
除了全球的生態超限日，也可透過某一國家的生態足跡計算該國自己的生態超限日。Earth Overshoot Day (2020) 將世界主要國家的生態超限日以時鐘的方式呈現，又稱為地球鐘 (Earth Clocks) (圖 17)，使世界各國可以互相比較彼此永續的程度，以及反映各國生態赤字的嚴重程度。由圖中可知，主要已發展國家很快就達到該國的生態超限日，意即這些國家對其國內自然資源的消耗非常快速，生態赤字的情況也較為嚴重。反之，許多東南亞、非洲及中南美洲的開發中國家，大多較晚達到生態超限日，其中印尼更是接近年底才開始呈現生態赤字的情況。

由於 GFN 並未納入台灣的生態足跡資料，故本計畫參考 GFN 的計算方式，自行計算我國的生態超限日。計算方式為將台灣生態標竿除以生態足跡，再乘上一年 365 天，即可得出生態超限的天數，再將此天數轉換為月份與日期，如下所示：

$$\text{生態標竿} / \text{生態足跡} \times 365 (\text{天}) = \text{天數}$$

生態超限日可作為探究台灣是否邁向永續發展的指標，因此，本計畫嘗試計算台灣 1994 年至 2018 年之生態超限日，以了解台灣的發展究竟是邁向永續或遠離永續。首先，需計算台灣 1994 年至 2018 年的生態標竿與生態足跡之比值 (表 32)，接著再以此比值乘上 365 天，即可求得台灣歷年生態超限的天數，天數越少表示生態超限日越快到

來，也代表台灣的發展越不永續（表 33）。若要求得確切的生態超限日，僅需將生態超限天數換算成日期即可。



資料來源：Earth Overshoot Day, 2020

圖 17、地球鐘（Earth Clocks）

表 32、1994 年至 2018 年台灣生態標竿與生態足跡之比值

年份	1994	1995	1996	1997	1998	1999
生態標竿	2.25	2.09	2.09	2.09	2.09	2.09
生態足跡	5.09	5.04	5.03	6.50	5.07	5.35
	0.44	0.41	0.42	0.32	0.41	0.39
年份	2000	2001	2002	2003	2004	2005
生態標竿	1.95	1.95	1.95	1.95	1.95	1.83
生態足跡	7.69	7.15	7.45	7.49	6.41	7.01
	0.25	0.27	0.26	0.26	0.30	0.26
年份	2006	2007	2008	2009	2010	2011
生態標竿	1.81	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78

生態足跡	6.57	6.74	6.35	6.19	6.73	6.71
	0.28	0.26	0.28	0.29	0.26	0.27
年份	2012	2013	2014	2015	2016	2017
生態標竿	1.40	1.32	1.38	1.31	1.22	1.27
生態足跡	6.61	6.30	6.48	6.47	6.40	6.51
	0.21	0.21	0.21	0.20	0.19	0.20
年份	2018					
生態標竿	1.29					
生態足跡	6.46					
	0.20					

表 33、1994 年至 2018 年台灣生態超限天數

年份	1994	1995	1996	1997	1998	1999
生態超限天數	161	151	152	117	150	143
年份	2000	2001	2002	2003	2004	2005
生態超限天數	93	100	96	95	111	95
年份	2006	2007	2008	2009	2010	2011
生態超限天數	101	96	102	105	97	97
年份	2012	2013	2014	2015	2016	2017
生態超限天數	77	76	78	74	70	71
年份	2018					
生態超限天數	73					

由表 33 可得知，台灣自 1994 年至 2018 年生態超限日越來越早到來，反映出台灣並非邁向永續發展，而是越來越背離永續發展，持續挪用其他地區的自然資源或超支未來世代的自然資源。根據計算結果，台灣 1994 年的生態超限日為 6 月 10 日，至 2018 年台灣的生態超限日在 3 月 14 日便已經到來，提前將近三個月，生態超限日的大幅提前不僅反映出台灣生態赤字嚴重的情形，也指出我國對自然資源的消耗程度（圖 18）。

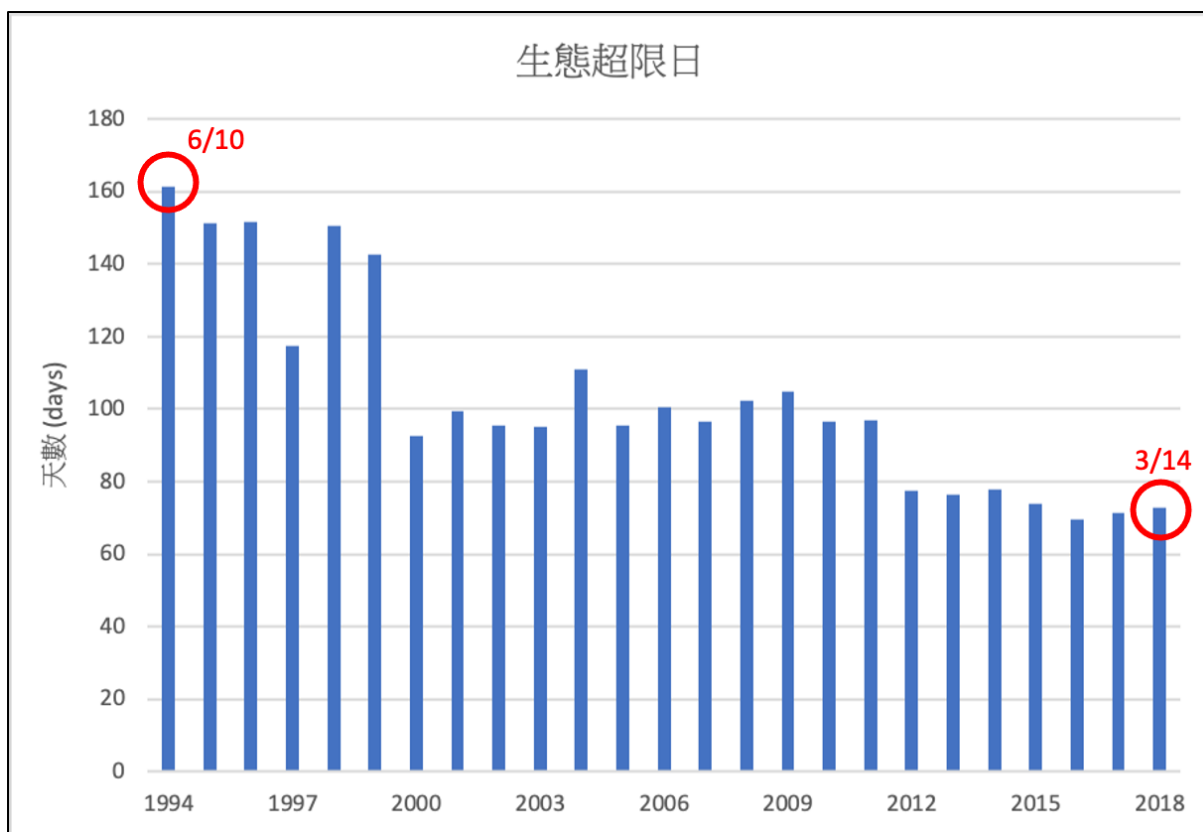


圖 18、1994 年至 2018 年台灣生態超限日

此外，GFN 及相關組織更設計方便計算個人生態足跡以及個人生態超限日的網站和手機應用程式，使個人可以快速得知，若全世界的人口都跟自己擁有一樣的生活方式，全世界的自然資源將會多快速地被消耗殆盡。舉例來說（圖 19），如果全世界的人口都過著跟美國人一樣的生活，那麼全人類需要五個地球才能得到我們所需的自然資源。本計畫換個角度思考，若全世界的人口都過著跟台灣一樣的生活，需要多少個地球？由於 GFN 沒有台灣的生態足跡資料，因此本計畫以美國為基準，將台灣 2018 年人均生態足跡，除以美國 2018 年人均生態足跡，再乘上圖 19 的美國地球數量，即可求得若全世界人口都過著跟台灣一樣的生活，需要多少個地球才能支持全人類的生活。

根據 GFN (2020) 的資料，美國 2018 年生態足跡約為 8.1 全球公頃／人，台灣 2018 年的生態足跡則為 6.46 全球公頃／人，兩者相除之後再乘上美國在圖 19 中的五個地球，計算出若全世界人口都過著跟台灣一樣的生活，需要四個地球才能支持全人類的生活。若全球人口都過著台灣人的生活，需要消耗的資源雖少於美國，但相較於世界其他主要國家如俄羅斯、印度、德國，以及鄰近的日本，台灣的生活方式所消耗的資源皆超過上

述國家，不僅反映出台灣對自然資源的消耗程度，更警惕台灣應該加緊腳步注重永續發展與減少資源消耗。



資料來源：Global Footprint Network, 2020

圖 19、我們需要幾個地球？

以上這些方式不僅具有社會溝通的成效，使人們反思自己的生活方式及對自然環境的利用情形，也具有作為政府制定相關政策的參考價值，使政府在制定永續發展相關政策時得以藉此反映國內情況，以及更深入地探討至個人層面，使相關政策的擬定及執行更加貼近一般大眾的生活，或許能更為有效地朝永續發展的目標努力。

本計畫也建議，可透過反映民眾日常生活的情況來達到社會溝通的成效。舉例來說，以一般大眾的日常消費著手，例如到市場購買某種特定的漁獲，在二十年前只需要少量的花費即可滿足家庭日常的食用需求；然而今日不僅花費大量增加，漁獲更只剩下二十年前的一小部分。以民眾的日常生活作為社會溝通及政策執行的參考依據，不僅貼近民眾生活，也能使一般社會大眾對資源消耗以及永續發展有更多切身的感受，當生態赤字的情況確確實實地反映在日常生活之中，民眾才會開始有所警覺並嘗試做出改變。

## 第五章、 混合型生態足跡研究方法：以台北市為例

本計畫除了以由上而下的研究方式計算生態足跡，並將其應用於國家之間的比較與討論，另參考 Świąder et al. (2020) 提出的混合型生態足跡計算方法為基礎，實際以台北市為案例計算台北市的生態足跡與生態標竿。以下將分別說明混合型生態足跡的研究方法、計算過程以及結果討論。

### 第一節、 地區級生態足跡的計算方式：比例法、個體抽樣法與混合法

生態足跡在全球、國家、區域的尺度有相當豐富、精確、穩定的資料，然而，由於資料取得的限制，目前地區層級（local scale）的尺度，卻缺乏精確與穩定的計算方式。儘管在北美、南美、歐洲與東亞，有大約 25 個國家曾進行地區層級（個別城市）的生態足跡計算，但是方法差異相當大（Świąder et al., 2020），個別的計算方式可以分成三種類型：比例法（上至下）、個體抽樣法（下至上）、混合法。

**比例法：**計算方式是透過聯合國 COICOP(依照目的分類的各別消費)的項目分類，針對國家與地區的消費數量進行比例換算，例如，波蘭 Wroclaw 的肉類消費是平均每人 4.56 公斤，波蘭全國則是 5.32 公斤，可以將兩者對除得到一個比例係數（scaling factor）0.86；並依此類推繼續計算蔬菜、米糧、衣物、醫院服務、教育服務、郵政等項目，若缺乏資料，在一般情形中則假設比例係數為 1。最後，將各類項目轉換為對應之生物生產力土地，即可將全國的生態足跡依照個別項目進行比例係數的轉換（Świąder et al., 2020）。這是一種上對下的比例轉換，優點是只要資料齊全，計算方式相當方便。然而，卻相當依賴分類清楚的統計項目，另外，也難以突顯個別地區生活方式的差異，最後，也很難反應環境政策（環境稅如垃圾處理收費等）的效果。

**個體抽樣法：**計算方式與比例法相反，其計算方式由個體的生活方式出發，以地區抽樣、年齡抽樣、隨機抽樣等方法，針對特定地區的居民進行結構化的問卷調查。例如李永展（2013）曾經透過隨機抽樣的方式，針對台北地區居民的生活方式進行調查。此種做法的差異是藉由樣本反應母體的實際樣貌，優點是凸顯生活方式的差異，資料也相

當細緻。然而，此種調查方式的問題是成本相當高。近年來，此種抽樣方式結合網路科技，利用網路問卷的方式累積相當龐大的資料，有效地節省成本<sup>3</sup>。

**混合法：**計算方式有效地結合比例法與個體抽樣法的優勢，利用統計資料的方式進行計算以節省成本，但是重新設計地區級的資料類型，以反映地區的特性。混合法的 basic 假設是：獨立計算地區碳足跡，反映區域特性（下至上），並結合其他五種生態足跡（上至下），混合成地區之生態足跡。其原理是，碳足跡佔總體生態足跡的比例約 6 成（台灣將近 7 成）以上，是最主要的生態足跡成分，又個別地區的生活方式差異，對碳足跡的影響最大（例如汽車使用、電力、污水、垃圾等等）。

## 第二節、 台北市的地區級生態足跡計算—以混合法進行計算

以下將以台北市作為分析標的，嘗試以混合法進行計算。混合型生態足跡計算分成傳統生態足跡部分與碳足跡（CF），台北市之傳統生態足跡（EF without CF）包含耕地足跡、牧草地足跡、漁場足跡、森林地足跡及建成地足跡，計算結果如第四章所述；本節將說明混合型的碳足跡計算方法，其計算方式如下。

碳足跡計算方式參考 Świąder et al. (2020) 的分類方式，將碳足跡的來源簡化為三大類，分別是食物碳足跡（食物消費／廚餘）、住房碳足跡（水／電力／瓦斯／垃圾處理／污水處理）與交通碳足跡（公共運輸／私人運具）。所有的碳足跡相關資料，以 2018 年度為準，所有計算項目都以 2018 年之森林地的等值係數（EQF）為全球公頃之轉換依據，約為 1.29，並且以 Mancini et al. (2016) 所採用的全球海洋二氧化碳吸收率（global CO<sub>2</sub> sequestration rate, I<sub>sCO2</sub>）（0.28）計算之。本計畫先行計算所有項目的碳足跡，最後統一乘上等值係數與二氧化碳吸收率。

$$EQF * I_{sCO_2} = 0.9288$$

根據行政院主計總處（2018）發布之 2018 年家庭收支調查，全台平均家戶年支出為 81 萬元，台北市為台灣所有城市支出之冠，台北市家戶年支出為 108 萬元，其中住房（「住宅服務、水電瓦斯及其他燃料」與「家具設備與家務維護」）比例最高達 29.64%、

---

<sup>3</sup> Global Footprint Network（全球足跡網絡）建置「足跡計算器」（Footprint Calculator），利用網路下拉式互動選單，針對個人的生活方式進行調查，包含食物、住房規模、房屋建材、交通、電力使用、垃圾處理、旅遊、年均飛行時數等等，並針對個別細項做客製化的調查。



食物(「食品、飲料及菸草」與「餐廳及旅館」)比例次之為 25.85%、交通方面為 7.14%，其餘則為教育、醫療保健、菸酒等他項消費。

## 1. 食物碳足跡

食物碳足跡由食物消費 (food consumption) 與廚餘 (food waste) 組成。計算方式是該地區人口數\*食物人均消費「重量」(kg)。然而，在台北市的個案中，食物消費量缺乏「重量」數據，另外，儘管產生相當大量的廚餘，但是台灣特有的回收文化與衍生之廚餘再製技術，使得廚餘回收率幾乎達 100%，因此計算方式將予以調整。

台北市缺乏食物消費的「重量數據」，在消費面上，以台北市主計處(2018)編印之「台北市家庭收支記帳調查報告」中，以 COICPO 為基礎計算食物的消費，其計算單位是新台幣元，而非重量。在供給面上，台北市家禽批發市場、台北果菜市場、台北市環南市場等批發市場有紀錄相關銷售重量，但是其數據強調北台灣之交易市場情況，而不能鎖定運銷終端是否為台北市。

因此，在缺乏食物消費的重量數據限制因素下，食物消費項目採用「比例法」，以台北市人口比例進行換算，以食物類別之傳統生態足跡包含，耕地 (1.81)、牧草地 (0.12)、水產地 (0.18) 三者傳統生態足跡加總為 2.11，換算人口係數 0.113 (2.6/23 百萬人)，約為 0.239 全球公頃/人。

另外，以主計總處發布之 2018 年家庭收支調查，換算比例係數。全台平均家戶年支出為 81 萬元，台北市家戶年支出為 108 萬元，比例係數為 1.33。經過計算後，台北市食物消費之食物足跡為 0.318 全球公頃/人。由於挪用傳統生態足跡之「食物足跡」部分，值得討論是否須扣除重複計算之項目。

在 Świąder et al. (2020) 的分析中，廚餘屬於垃圾處理的一部分。但是，台灣在資源回收的相關環保政策上相當落實，根據台北市環保局之數據，2018 年，台北市廚餘回收量為 65,285 公噸，日平均為 179 公噸，其中養豬廚餘佔 12 公噸 (7%) 堆肥廚餘佔 167 公噸 (93%)。根據台北市環保局 (2018) 之資料顯示，將近 100% 的廚餘都被回收再利用，養豬廚餘配送至養豬場，堆肥廚餘進行處理後，轉換成固態堆肥、液肥與土壤改良劑。在此前提下，廚餘的回收利用反而強化其他生物生產力土地之生產力，另外台北市廚餘回收率將近 100%。因此，在上述的前提下，建議不計算廚餘項目之食物碳足跡。

## 2. 住房碳足跡

電力碳足跡的計算方式，是以該地區人口數，乘以人均使用度數，也就是使用總量。並以使用總量乘上電力之二氧化碳排放指數數據，得出該用電度數產生多少公噸之二氧化碳。根據經濟部能源局網站公布之「電力之二氧化碳排放指數」（2018），一度電約產生 0.528 公噸之二氧化碳。依據台北市統計資料庫<sup>4</sup>所公布之數據，台北市 2018 年總共消耗 16193.21 百萬度之電力，平均每人約 2857 度電力，計約 39221 全球公頃之碳足跡，人均碳足跡約為 0.015 全球公頃／人。

水的碳足跡計算方式，是以總供水量，乘以供水所需之水庫、水道、淨水系統等總體供水科技的運用所耗費之電力，換算為等量之二氧化碳排放量。根據經濟部水利署自來水統計（2020）顯示，台北市 2018 年人均每日用水量約為 332 公升。在供水科技方面，分為水庫儲水與自來水供水兩大系統。首先，根據中興工程顧問公司 2012 年之報告顯示，水庫儲水的碳排放包含水庫建設、抽污吸除淤泥、水庫維運等，經過計算後，約為每出水 1 立方公尺 0.0012~0.0208 公斤二氧化碳當量；在供水系統上，以自來水公司之「總電力消耗量+總油耗量/總供水量」計算，每一公噸供水約耗費 0.156 公斤之二氧化碳排放。經過加總，每公噸供水約排放 0.001768 公噸之碳排放量。經過計算，以台北市人口（264 萬人）數乘上人均每日用水量（332 公升）再乘以 365 天，並且再乘上每公噸供水之碳排放量（0.001768），可以得到碳足跡量約 557,040.224 全球公頃，人均為 0.214 全球公頃／人。

天然氣的碳足跡計算方式為地區總人口數乘以人均瓦斯用量，並乘以液化天然氣的熱值（以卡路里表示）。在台北地區，根據台北市主計處的說明（台北市重要統計數據速報，2018），大約有 8 成的家戶使用天然氣，另外兩成使用桶裝瓦斯。由於缺乏桶裝瓦斯確切的銷售數字，本計畫以天然氣為主，並假設桶裝瓦斯的人均用量與天然氣相同，以天然氣的熱值估算之（兩者大約差 0.9 左右）。根據台北市統計資料庫的資料顯示，台北市 2018 年天然氣的年消耗量約 338,425 立方公尺；依照經濟部能源局提供的能源產品單位熱值表進行能量密度換算，每立方公尺的天然氣熱值約為 27.76 GJ/m<sup>3</sup>。經過計算，台北市瓦斯的碳足跡為 11,743.3 全球公頃，人均足跡為 0.0045 全球公頃／人。

---

<sup>4</sup> 查詢日期：2020/11/12

污水的碳足跡計算方式，與電力之計算方式相同。以污水總處理量，乘以電力之二氧化碳排放指數。2018 年台北市污水總收集量為 295 百萬立方公尺（台北市統計資料庫查詢系統）<sup>5</sup>，污水下水道接管處理率為 82%。最後經二級處理之處理量為 201 百萬立方公尺。根據黃文昌等（2012）有關污水處理節能之技術文章顯示，廢污水處理廠運轉相當耗費能源，「廢(污)水處理廠運轉能耗指標，一般以 kWh/m<sup>3</sup>（單位水處理量所耗用的電能）或 kWh/kgBOD<sub>5</sub>、kWh/kgCOD（每去除單位重量的污染物 COD 或 BOD<sub>5</sub> 所消耗的電能）為單位，若以 kWh/m<sup>3</sup> 為污水處理耗電量單位，依據資料顯示，1999 年日本全國污水廠平均約 0.26kWh/m<sup>3</sup>，美國約 0.2kWh/m<sup>3</sup>，2000 年德國污水處理廠平均用電損耗為 0.32kWh/m<sup>3</sup>」，本計畫採三者平均值：污水廠 0.26kWh/m<sup>3</sup>。經計算後，污水處理大約產生 27,593.28 全球公頃的碳足跡；而人均碳足跡為 0.01060 全球公頃／人。

垃圾的碳足跡計算方式，在 Świąder et al. (2020) 的分析中必須扣除廚餘之重量，然而台灣的資料相當精細，垃圾的重量已經扣除廚餘之重量。因此，統計垃圾場之處理量，換算垃圾處理所產生之二氧化碳排放量。台北市有三大垃圾處理廠，2018 年之處理量各別為：內湖 12123 公噸、北投 40196、木柵 20660，合計為 72979 公噸（台北市統計資料庫查詢系統）。<sup>6</sup>

根據看守台灣基金會（2007）的換算，「以『體現能』來估算家戶垃圾從原料開採到成為產品時所需的能源。依 94 年度的垃圾成分，1 公斤的家戶垃圾中有 13.78% 的塑膠、0.43% 的皮革、38.64% 的紙類、2.08% 的玻璃、0.85% 的金屬等主要由人造產品所產生的廢棄物（其餘成份如廚餘與木竹 稻草落葉類等不計），這些成分的體現能於 1 公斤的垃圾中約有 28.62 MJ（百萬焦耳）」。因此，每年 72979 公噸之垃圾，需投入之能量，相當於 579.31 百萬度電。經過換算，大約為 1402 全球公頃，平均每人約 0.00053 全球公頃／人。

### 3. 交通碳足跡

交通碳足跡分成公共運輸與私人運具部分，公共運輸又進一步細分為公車與軌道運輸。其中，軌道運輸部分在台北有捷運、台鐵、高鐵通過，又服務範圍擴及整個大台北地區，相當難計算實際的運輸里程。根據蘇昭旭（2020）的

---

<sup>5</sup> 查詢日期為 2020/11/12。

<sup>6</sup> 查詢日期為:2020/11/12。

分析，軌道運輸分成捷運與城際鐵路，在此僅計算捷運的部分，認定捷運為主要的公共軌道運輸，並將台鐵、高鐵認定為城際鐵路，排除在計算之外。在私人運具部分，台灣是機車大國，全台共有 1000 萬輛以上的機車，也是大台北地區主要的交通方式，因此除了小客車與大客車，另外計算機車的交通碳足跡。

公共運輸的碳足跡，主要的計算方式是以年度總服務里程數，乘上該運具每公里的碳排放量。根據台北市交通統計查詢系統提供之資料，公車 2018 年的總行駛里程為 175,603,933 公里；捷運 2018 年的總行駛里程 22,941,921 公里。在 Świąder et al. (2020) 的分析中，公車每公里排放 1.6 公斤的二氧化碳、捷運每公里排放 10.1 公斤的二氧化碳。經過計算後，台北市 2018 年公共運輸的碳足跡為 512,679.6949 全球公頃，人均公共運輸碳足跡為 0.19719 全球公頃／人。

私人運具的碳足跡，計算方式透過車輛總數，乘以該類型車輛之年均耗油量，並將油耗量依據能源種類(汽油、柴油、電/混合動力)進行轉換。在 Świąder et al. (2020) 的分析中，並沒有計算「機車」種類的車輛，但在台北市，約有 90 萬輛機車、80 萬輛客貨車，機車龐大的數量難以忽視，因此，比照客貨車的計算方式進行。另外，在 2018 年「電動/混合動力」的車輛已大幅成長，機車有 1 萬輛、客貨車有 2 萬輛，不可忽略不計。其能量轉換方式，依照 Urban Cycling Institute 的報告指出，電動車的能源利用效率與汽油車差不多 (Fishman, 2020)，因此計入汽油車的碳足跡計算方式。

首先計算機車，90 萬輛機車中，以汽油機車為多數，其中普通重型機車的數量約 86 萬輛，超過 9 成強 (台北交通統計查詢系統)<sup>7</sup>，因此，計算時統一以 125cc.款式之機車年耗油量進行估算。在年油耗量的數據上，採用三陽機車公司提供之「能源效率表」，並選取 125cc.級距共 14 款機車款式，這些款式涵蓋不同級別的燃料消耗級數 (1-5 級，1 級耗油少高效率，5 級耗油多低效率)。簡而言之，要呈現不同出廠年份的新舊款機車之燃油效率平均值，平均年油耗為 95 公升。汽油機車總數為 924,482 輛，電動機車總數為 11,776 輛，經過計算總計消耗 88,944,510 公升汽油。

---

<sup>7</sup> 查詢日期為 2020/11/12。

接著計算客貨車，客貨車包含小客車、大客車、小貨車、大貨車，根據台北交通統計查詢系統顯示，約 9 成小型車輛使用汽油、8 成大型車輛使用柴油，因此本計畫假設小型客貨車使用燃料為汽油、大型客貨車使用燃料為柴油。並且，將電動／混合車輛統一計入汽油車的車輛數之中。汽油車（含電動車）總數為 721,615 輛，柴油車總數為 86,511 輛，在 Świąder et al. (2020) 的分析中，汽油車年油耗為 1200 公升、柴油車年油耗為 1050 公升。經過計算，汽油車年消耗 865,938,000 公升汽油，柴油車年消耗 90,836,550 公升柴油。

總計台北市私人運具年消耗 931,562,910 公升汽油（汽油轉換兆焦耳係數為 32.2、CO<sub>2</sub> 排放係數為 73.1）；90,836,550 公升柴油（柴油轉換兆焦耳係數為 35.9、CO<sub>2</sub> 排放係數為 73.1）。將汽油與柴油公升數乘上汽（柴）油兆焦耳轉換係數再乘以碳排放係數，即得到總排放的碳足跡數目。經過計算後，碳足跡為 2,434,048 全球公頃，平均每人 0.936 全球公頃／人。

### 第三節、 研究結果與討論

混合型算法是一種結合傳統生態足跡「由上至下」的全國統計資料計算（計算耕地、牧草地、森林地、水產地、建成地等五種生態生產力土地），以及「由下而上」的地區級碳足跡，將兩者混合疊加的計算方式。這種計算方式的優點是節省研究成本、也能反映區域特性，並藉此體現環保與永續政策的效果，亦能顯現都會區的生態足跡，其實遠比想像的還要更大，生活方式更遠離永續。

表 34、台北市混合型碳足跡計算表

（單位：全球公頃／人）

項目	食物	住房					交通		總計
gha	0.239	0.245					1.133		<b>1.617</b>
細項	食物 碳足 跡	電力	水	污水 處理	垃圾 處理	瓦斯	大眾 運輸	私人 運具	
gha	0.239	0.015	0.214	0.011	0.001	0.005	0.197	0.936	

台北市混合型生態足跡計算之人均碳足跡為 1.617 全球公頃／人，其中交通碳足跡最高，高達 1.133 全球公頃／人，住屋碳足跡次之為 0.245 全球公頃／人，食物碳足跡

最低為 0.239 全球公頃／人。分析後發現使用私人運具是最高的碳足跡排放來源，經過交叉驗證，2018 年台北市賣出 8 億餘公升的汽油，數量相當可觀（經濟部能源局各縣市汽車加油站汽柴油銷售統計，2018）。而供水、污水處理也排放相當多的二氧化碳，反映出台北市人均用水量高居全台灣之冠的問題。電力使用所佔之碳排放量相較其他項目並不突出，本計畫認為，由於供水、污水、垃圾等項目，都是轉換成電力做碳足跡計算，因此當各別區分開時，電力所佔之碳足跡比例因此下降。

台灣之傳統生態足跡為每人 6.46 全球公頃，其中，耕地足跡 1.81 全球公頃、牧草地 0.12 全球公頃、水產地 0.18 全球公頃、森林地 0.27 全球公頃、建成地 0.19 全球公頃、碳足跡 3.89 全球公頃；台北市的混和型生態足跡，若排除耕地、牧草地、水產地（排除食物類別生態足跡），僅計算森林地、建成地與碳足跡。將森林地與建成地加總後，同樣依照家庭收支進行比例換算，這部分的生態足跡為 0.512 全球公頃／人。台北之混合型生態足跡為【森林地+建成地+碳足跡】0.512+1.671 為 2.129 全球公頃／人。接著進一步依照家庭收支做比例係數轉換，台北市混和修正的生態足跡為 2.837 全球公頃／人（EF'-Taipei），台北市混和修正的碳足跡為 2.154 全球公頃／人（CF'-Taipei）。可以發現，即便透過家庭收支進行比例換算，台北市的人均生態足跡比起台灣傳統生態足跡還低，生態足跡大約 1/3，碳足跡大約 1/2。這個計算結果與國際前瞻研究並不一樣，在 Świąder et al. (2020) 的分析中，東歐都市的混和型計算結果比全國傳統型還要高，值得後續再深入探討（表 35）。

表 35、2018 年台灣與台北的（混合型）生態足跡換算表

（單位：全球公頃／人）

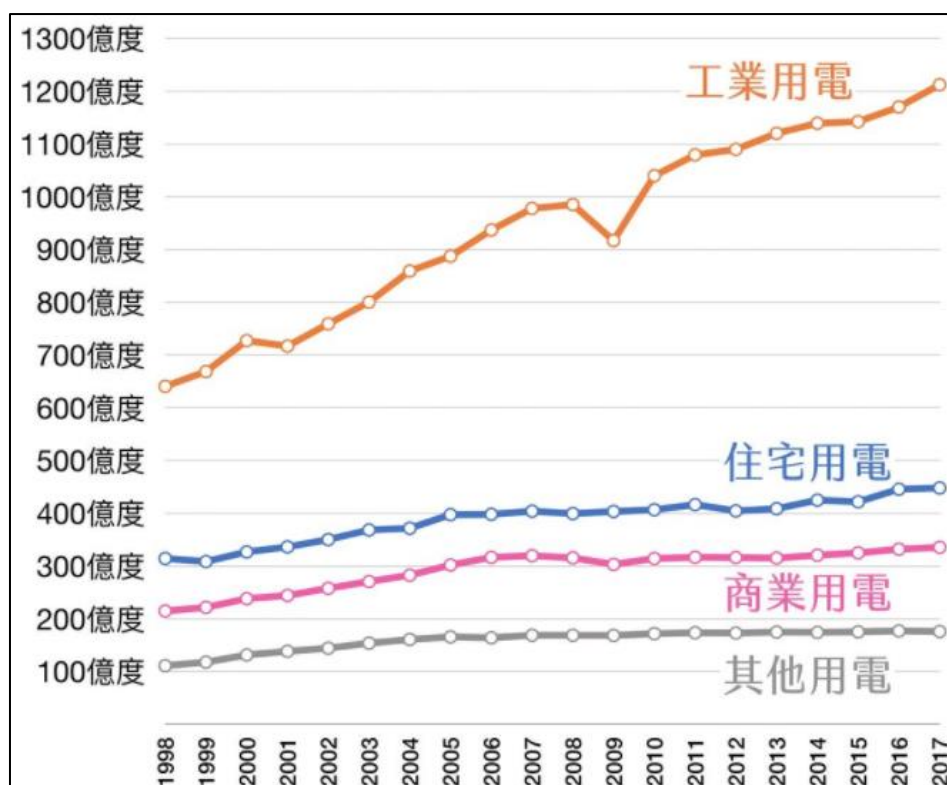
水	全台灣 （傳統）	台北部分 （混合）	台北部分 （混和修正）
生態足跡	6.460	2.129	2.837
碳足跡	3.890	1.617	2.154

有三者值得討論：第一，本計畫認為，生態足跡的精神是嘗試量化人類活動過度消費的實際狀況，而地區型的生態足跡計算旨在凸顯個別地區的生活風格，是否強化／削弱過度消費的情形。因此，在凸顯個別地區生活方式的前提下，參考「比例法」的換算機制，依照「家庭收支」的比例差異做轉換。若傳統方式的生態足跡，依照家庭收支做比例係數轉換，台北市混和型生態足跡為 2.837 全球公頃／人（EF'-Taipei），台北市混

合型碳足跡為 2.154 全球公頃／人 (CF'-Taipei)。此計算方式值得進一步精進，藉由國際前瞻研究的建議，透過混合型計算方式實際計算台北市的生態足跡。

第二，由於食物碳足跡統計項目缺乏，因此挪用生態足跡三種與食物相關之用地(耕地、牧草地、林產地)的生態足跡，依照人口比例與家庭生活收支的比例係數做轉化。在這種計算方式下，食物項目的生態足跡，是否重複計算？又是否應該扣除？本計畫認為，在 Świąder et al. (2020) 的分析中，並非重複計算「食物」的生態足跡，因為耕地、牧草地、水產地的「食物」屬於「生產類」，而碳足跡部分的「食物」屬於「消費類」，兩者基本概念並不一樣，因此不必扣除。在本計畫中，由於直接借用食物類生態足跡的數值，若再次加總則會重複計算，本計畫建議僅需計算一次即可。在地理尺度與生活方式差異的意義上，台灣的食物自給率低、不論是跨國交易或是南北交流均相當頻繁，食物的生態足跡難以定著在特定場域中，但是關鍵的差異是生活方式仍然相當不同，具體體現在家庭收支差異上，因此，本計畫認為，在食物碳足跡統計項目缺乏的前提下，借用食物類別的生態足跡數值，應以比例係數修正區域的差異，並且不再重複計算，混合型的生態足跡僅計算建成地、森林地與碳足跡（包含食物生態足跡）。

第三，本計畫發現台北市的「住房碳足跡」計算結果偏低，為 0.245 全球公頃／人，但是東歐都市卻高達 3.140 全球公頃／人，相差近 10 倍以上。針對這個結果，本計畫推測有兩大原因：第一是地理緯度的氣候差異，差別為是否應用供暖設備。供暖設備耗費相當大的電能與瓦斯，東歐都市非常需要供暖設備度過嚴寒的冬天，但台灣的日常生活並不常使用高耗能的供暖設備。反之，台灣夏季炎熱需要使用冷氣降低室內溫度，但是總體台北市的電力碳足跡卻只有 0.015 全球公頃／人，這點值得後續研究進行探討與計算。第二，循著電力使用的線索，若台北市的生態足跡偏低，那究竟台灣哪個縣市的生態足跡偏高？依據台電的統計數據，非民生用電類別占比大約 7 成以上，而且數字穩定成長中，是台灣消耗電力的主要部門。由此推測，相關工業縣市的高耗電量，或許是碳足跡比例較高的主要來源（圖 20）。



資料來源：台灣電力公司，2020

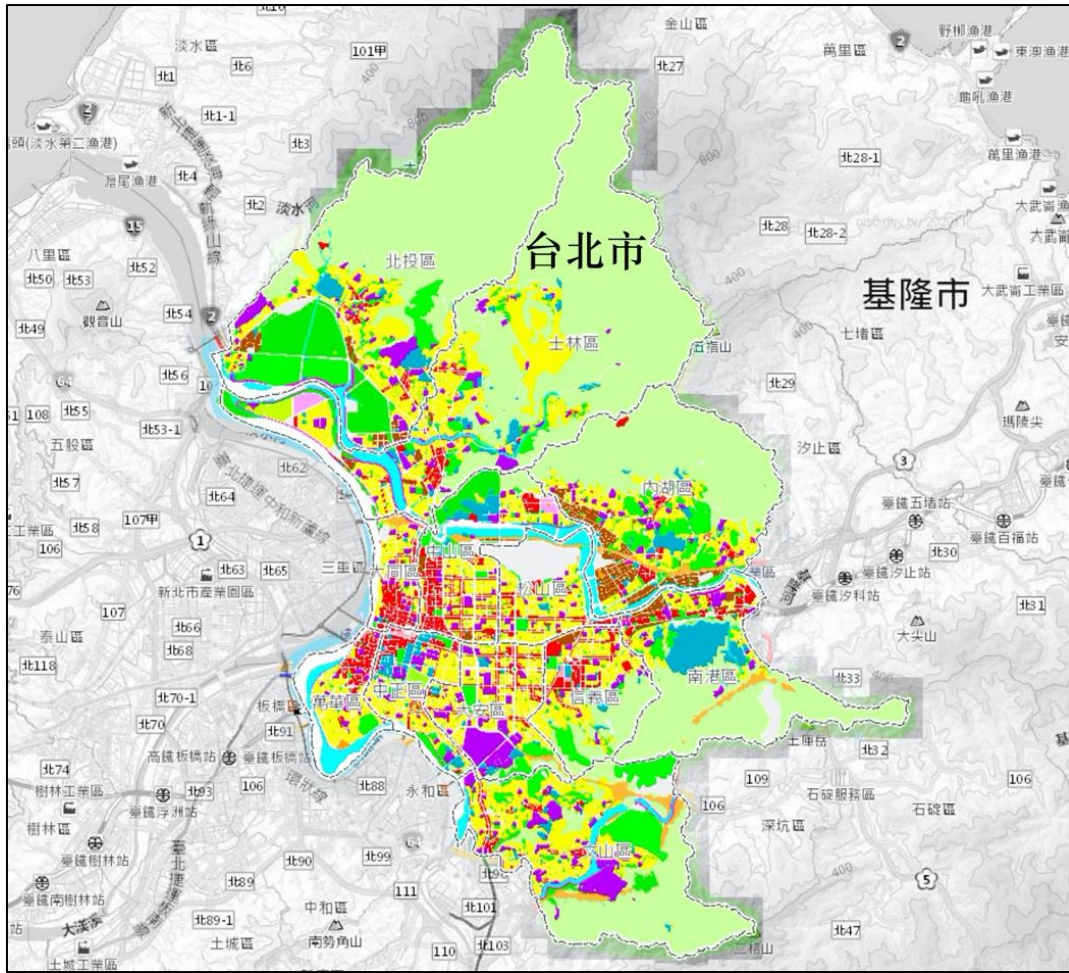
圖 20、台灣 1998-2017 年電力消耗度數 (依照用途別)

#### 第四節、 混合型算法之台北生態足跡與生態赤字

計算完生態足跡後再計算生物容受力，便能計算出台北市的生態赤字。本計畫採用的方式是透過各類生物生產力土地的面積，並乘上對應類別的生產因子 (YF) 與等值因子 (EQF)。本計畫藉由台北市政府都市發展局統計資料科所建置的查詢系統之都市計畫相關數據<sup>8</sup>，計算各類土地面積 (圖 21)。查詢項目包含台北市面積為 27 萬餘公頃，扣除保護區後約為 22 萬公頃，其中耕地對應農業區，面積約為 600 餘公頃；牧草地對應風景區，面積約為 185 公頃；漁場地對應河川區，面積約為 1800 公頃；林地對應其他非發展用地；最後，建成地約佔台北市一半面積，面積約為 13 萬公頃。接著，將面積資料乘上 2018 年各類型土地的生產因子與等值因子後，即可得到台北市的生物容受力。將這個數字除以台北市總人口後，即可得到人均生物容受力，即人均生態標竿為 0.124 全球公頃／人 (表 36)。

<sup>8</sup> 查詢日期：2020/11/12，查詢項目為台北市都市計畫可供都市發展土地面積。





資料來源：修改自內政部國土測繪中心圖資服務查詢系統<sup>9</sup>

圖 21、台北市土地使用分區圖

表 36、台北市生物容受力計算內容

生態生產力土地	對應項目	面積(ha)	生產因子	等值因子	人口數	生態容受力
耕地	農業區	606.85	8.45	2.52	264000	0.005
牧草地	風景區	185.75	457.39	0.46		0.015
水產地	河川區	1795.72	0.65	0.37		0.001
森林地	非發展用地	6901	0.02	1.29		0.0001
建成地	都市發展區	12918.9	8.45	2.52		0.104
總計		22408.22				0.124

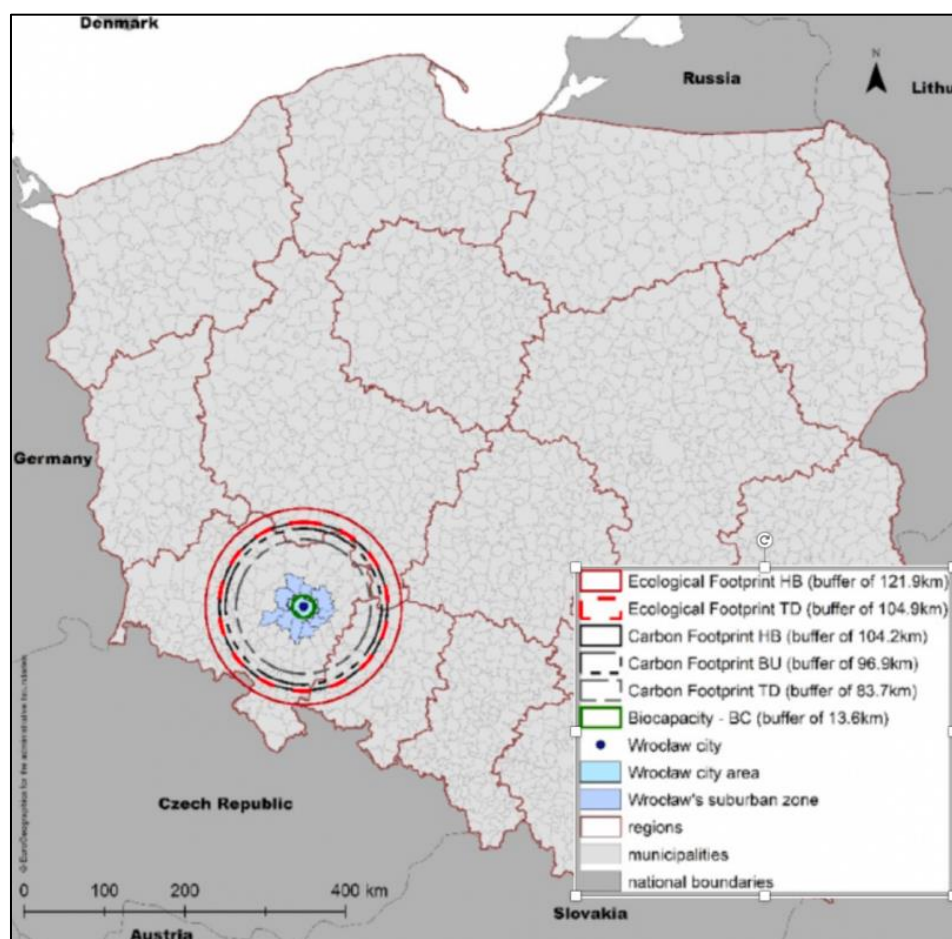
資料來源：整理自台北市政府都市發展局統計資料查詢系統

<sup>9</sup> 查詢日期：2020/11/12

最後，總結混合型算法的台北市生態足跡與生態赤字。本計畫的混合型算法結合「傳統型」與「混合型」，以耕地、水產地與牧草地等三項傳統生態足跡充當「食物碳足跡」，並結合住房項目（包含電力、水、瓦斯、污水、垃圾處理）以及交通項目（大眾運輸與私人運具）的碳足跡，應可稱為「進階混合型」的計算方式。經過計算後，排除耕地、牧草地、水產地（排除食物類別生態足跡），台北市人均生態足跡為 2.129 全球公頃，人均碳足跡為 1.617 全球公頃。

接著，經由上述台北市各類土地面積的分析計算，台北市的人均生態標竿為 0.125 全球公頃。由此進一步估算，台北市的人均生態赤字約為 2.000 全球公頃。每個台北人的生態足跡必須由台灣其他縣市、鄰近國家的生物生產力土地協助消化。

Świąder et al. (2020) 進一步透過 GIS 工具換算面積進行同心圓的疊圖分析，他們將生態足跡與生態赤字，換算成等值的面積後，以同心圓的方式呈現「外溢」到波蘭 Wrocław 轄區範圍之外的生態足跡（圖 22）。



資料來源：Świąder et al., 2020

圖 20、波蘭 Wrocław 的生態赤字疊圖分析

本計畫同樣以 GIS 工具換算面積進行同心圓的疊圖分析（圖 23），以人均生態標竿 0.124 全球公頃、人均碳足跡 1.617 全球公頃、人均生態赤字 2.000 全球公頃進行計算。以台北市人口數 264 萬人進行計算，得到生物容受力土地約 33,000 公頃、碳足跡 426,888 公頃、生態赤字 528,000 公頃。經過換算後，將同心圓疊上台北的行政轄區（圖 23）可以看出台北市的混合型生態足跡已經大幅溢出台北市的行政轄區，反而是生態標竿還不及台北市原來的面積。如同 1992 年，William Rees 探問的問題「What Urban Economics Leaves Out？」（都市經濟遺落了什麼？），這個圖像告訴我們，我們遺落在外的遠比我們想像的還多。

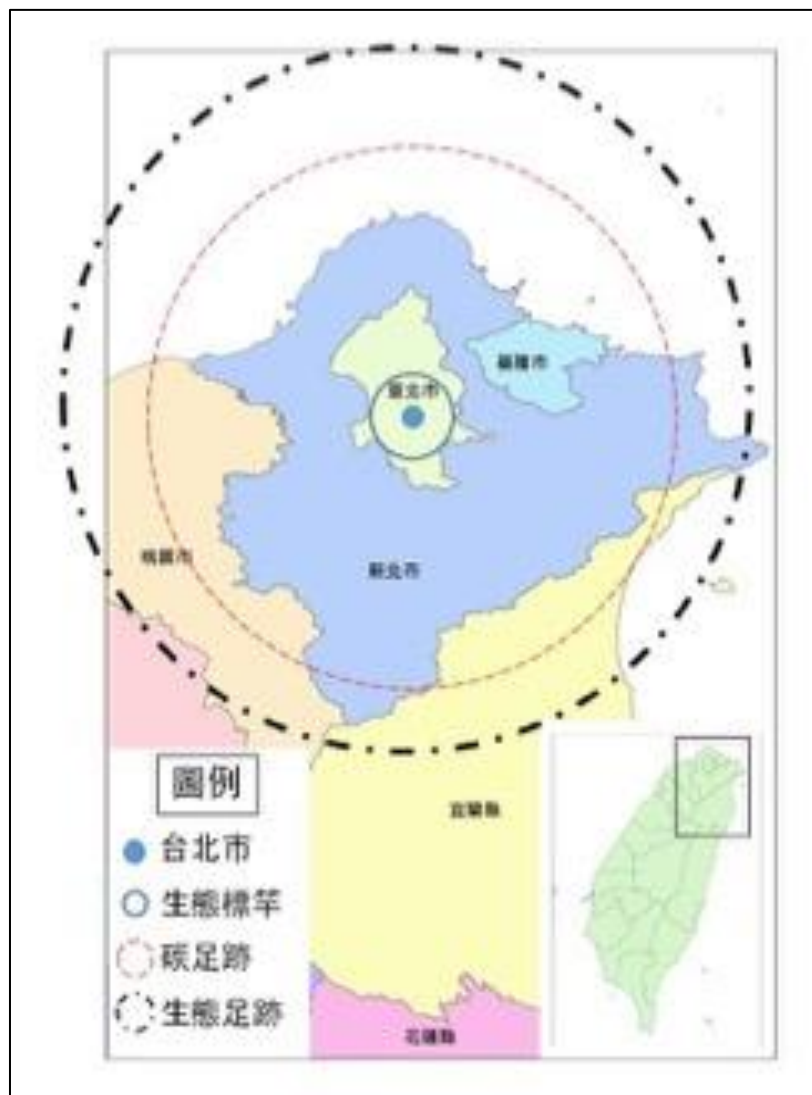


圖 21、GIS 疊圖分析台北市生態足跡



## 第六章、 結論與建議

本計畫承接長期以來由農委會林務局、中華經濟研究院等國內機關（構）進行的台灣歷年生態足跡研究（李永展、陳安琪，1998b；李永展，2005b；李永展，2006；Lee & Peng, 2014），並參照全球近年來如 GFN 等國際組織及研究者在生態足跡的研究發展與變革（Lin et al., 2018a; Lin et al., 2018b; Mancini et al., 2016），採用最新的研究方法計算我國 2012 年至 2018 年的生態足跡相關資料，並檢討歷年來的生態足跡研究。目前台灣已經計算的生態足跡區間自 1994 年至 2011 年為止，2012 年後的台灣生態足跡尚未有研究進行系統性計算，這是本計畫主要的研究範圍之一。本計畫期望將我國生態足跡研究及發展持續更新並與國際趨勢接軌，持續追蹤國際生態足跡算法變革，並建立長期追蹤台灣生態足跡變化趨勢的研究發展。本計畫的研究結果呈現台灣的生態足跡現況及歷年變化趨勢，作為相關政策與學術發展的借鑑，提供與減碳等國際重要環境議題息息相關的環境、能源及永續發展等政策方面之建議，並期望拋磚引玉作為未來生態足跡及其他相關研究的參考依據。

### 第一節、 結論

本計畫參照歷年來台灣的生態足跡研究，並以全球最新的研究方法檢討以及更新我國生態足跡研究資料，並根據近年來全球生態足跡研究趨勢修正我國研究方法。首先，本計畫檢討 1994 年至 2011 年之生態足跡，由於生物生產力土地及消費項目的變更、等值因子的更新、研究與計算方法的調整，以及資料來源的改變等，使歷年的生態足跡研究需要進行檢討與修正。本計畫首先以 2016 年之前國際研究上常用的碳足跡計算式（固碳率=3.4）修正我國 2014 年所計算之 1994 年至 2011 年台灣歷年生態足跡，使碳足跡和生態足跡皆向下修正並降低我國生態赤字。此外，本計畫亦以 Mancini et al. (2016) 及 Lin et al. (2019) 所採用之最新的碳足跡計算方法（固碳率=2.7）重新計算 1994 年至 2011 年之生態足跡，使我國歷年生態足跡資料與國際最新研究趨勢接軌。

其次，本計畫採用全球最新的研究方法，包含最新的碳足跡計算式，將台灣的生態足跡資料更新至 2018 年。在 2012 年至 2018 年之間，台灣的生態足跡維持穩定的趨勢，從 2012 年的 6.61 全球公頃／人，到 2018 年的 6.46 全球公頃／人，唯 2013 年出現較為明顯的下降，根據資料指出是由於該年耕地足跡的下降所造成，推測與 2013 年為近十

年來台灣發布颱風警報數量最多的一年有關。自 2012 年至 2018 年，台灣的耕地足跡從 2012 年的 2.05 全球公頃／人減少至 2018 年的 1.81 全球公頃／人，然而碳足跡卻反而從 2012 年的 3.71 全球公頃／人增加至 2018 年的 3.89 全球公頃／人，佔整體生態足跡的比例已經達到 70%，不僅超出國際平均的 60%，也反映出台灣的碳排放量與碳足跡與全球減碳趨勢背道而馳，為未來需要重點關注與檢討的議題。

第三，本計畫除了計算生態足跡，亦計算台灣的生態標竿（或生物容受力），並將生態足跡減去生態標竿後得到台灣的生態赤字。生態赤字可以作為台灣永續發展程度以及消費自然資源的重要指標。雖然我國 2012 年至 2018 年之生態足跡維持穩定，但由於生態標竿從 2012 年的 1.40 全球公頃／人減少至 2018 年的 1.29 全球公頃／人，造成我國生態赤字持續增加。Lin et al. (2018b) 指出全球生態赤字的增加主因是人口持續大量成長，然而台灣的人口自 2012 年至 2018 年僅成長 0.01%，而生態赤字卻成長 0.05%，可知台灣的生態赤字增加並不是人口成長所導致，反映出台灣自然資源逐漸減少，以及台灣不永續利用自然資源的情形越趨嚴重。

第四，生態足跡作為永續發展的指標之一，需將研究結果與社會大眾進行溝通，使一般民眾理解生態足跡的意義，並從日常生活中開始進行改變。GFN 發展出「生態超限日」作為社會溝通的工具之一，將生態赤字的概念反映在一年中的某一個日期，該日期即代表某地區或國家該年度自然資源消耗殆盡的時候，超限日之後的每一天都是在挪用其他國家的自然資源或超支未來的自然資源，也就是說超限日越早來臨代表某地區或國家的發展越不永續。由於 GFN 並未納入台灣的生態足跡資料，因此本計畫自行計算台灣的生態超限日並與全球主要國家進行比較。據計算結果，台灣 2020 年的生態超限日為 3 月 13 日；易言之，在 2020 年 3 月 13 日台灣就已經將我國生物生產力土地所能提供的自然資源消耗殆盡，剩下將近九個月的時間都在挪用其他地區的資源或超支未來世代的資源。此外，透過手機應用程式及電腦網頁，一般大眾亦可自行計算個人的生態足跡與個人的生態超限日，檢討個人的生活及消費習慣，藉此達到社會溝通與永續發展的成效。

最後，本計畫採用 Świąder et al. (2020) 提出的混合型計算方法，以台北市為例，實際計算地方層級的生態足跡。現今生態足跡的計算方式主要為由上而下的方式，其優點在於方便進行國家層級的計算，以及國與國之間的比較與討論，但缺點是無法反映出地方或個人的生態足跡，以及無法將生態足跡進行更詳細的分類。混合型的計算方法目的即為盡量更真實地呈現地方甚至個人的生態足跡以及其分類組成，因此本計畫以台北

市為例，實地計算台北市的生態足跡與生態標竿。最主要的方式為將碳足跡細分成不同的消費項目，例如交通及食物等，當分類項目越詳細，且越能反映大眾的日常生活，研究結果相對越能呈現社會的真實情況。台北市人均混合型生態足跡為 2.129 全球公頃；人均混合型碳足跡為 1.617 全球公頃／人，其中人均交通碳足跡最高，高達 1.133 全球公頃，人均住屋碳足跡次之為 0.245 全球公頃，人均食物碳足跡最低為 0.239 全球公頃。本計畫亦使用 GIS 進行分析，將台北市的生態足跡與生態標竿圖像化，更清楚地呈現整個台北市消耗的資源已大幅超出台北市所能提供的自然資源，甚至佔用其他行政區或挪用國外的自然資源。

簡言之，本計畫檢討台灣歷年生態足跡，將生態足跡資料更新至 2018 年，且一併計算台灣的生態標竿與生態赤字，並與全球生態足跡趨勢相比。此外，本計畫亦計算台灣的生態超限日，期望作為社會溝通的方式之一。最後則是採用混合型的計算方法，並以台北市為例，計算台灣地方層級的生態足跡，使科學研究更貼近真實社會情況並詳盡地呈現我國的生態足跡。

## 第二節、 建議

根據本計畫的研究結果，台灣的生態赤字持續增加，其中碳足跡佔整體生態足跡的比例接近 70%，不僅超出國際平均，且所佔比例仍在持續增加當中。減碳議題已然是全球焦點之一，其重要性在未來也會持續提升。因此，如何降低台灣的碳排放量和碳足跡，是未來政策發想與執行的要點之一，包括能源、環境、經濟和永續發展等政策皆須將減少碳排放以及降低碳足跡列為重點項目，而本計畫的研究結果亦能作為未來政策擬定與執行的參考依據。

此外，不論科學研究或是政策執行皆須與一般大眾進行溝通，本計畫所計算的台灣生態超限日即為社會溝通的工具之一，未來應該利用生態超限日、地球鐘、個人生態足跡調查、地區級混合型生態足跡算法等工具應用，多元複合性地利用，強化社會溝通的效果。根據專家學者座談會的討論，未來若有經費支應，可以利用網站甚至行動裝置的 App，製作互動式的介面，將生態足跡及永續發展的概念傳達予社會大眾，且能確實地落實在日常生活之中；本計畫建議有關單位必須仔細考量有效的社會溝通工具與方式。

除了政策與社會溝通方面，以本計畫為基礎，未來可持續進行多項相關的科學研究及學術討論。首先可以探討台灣生態赤字持續增加的原因，因為本計畫已經指出台灣

生態赤字的增加與人口成長缺乏關聯性但目前並未找出確切的原因，未來研究可以此為方向進行更深入的探討。

其次，由於目前生態足跡的研究方法無法反映出台灣的生產特性，例如農業二獲三獲以及遠洋漁業等方面，因此可能造成台灣生態足跡被高估而生態標竿被低估的情況。未來應考量台灣的生產特性，甚至以不同氣候區或地理位置進行區分，發展因地制宜的生態足跡研究方法，以便更真實地反映不同國家、氣候與地理位置的特性。

第三，以台灣而言，一種生物生產力土地可能有多項資料來源，且因為統計項目的不同數據上的差異，影響生態足跡的計算與研究結果。如何得到原始或第一手資料，使資料來源更加完備，進而更完整地計算台灣的生態足跡，是未來可以持續探討與改進的部分，包括取用不同的資料庫及田野調查等方式，都是可以深究的議題。

第四，現今的生態足跡研究大多以由上而下的方式計算國家的生態足跡，主要目的是與國際研究接軌，提供台灣的生態足跡資料。然而，如同 Świąder et al.(2020) 所指出的，由上而下的生態足跡很難在一國之內產生政策性的意義，也難以利用政策性的工具。對於大部分國人而言，台灣總體的生態足跡比較難產生共鳴，但從 GIS 繪製的結果發現原來都市生活所製造的生態足跡，需要其他鄉村地區來支應，這就有區域均衡的政策意義。

因此，本計畫採用混合型的計算方式研究台北市的生態足跡，以台北市的研究經驗為例，探討是否可以將此研究方法應用至各縣市進行地方層級的生態足跡研究。本計畫認為，相關數據在各縣市經濟發展局（處）或建設局（處）、主計處、電力公司與自來水公司等機關，皆有長期且可信的數據，未來若有經費支持，相當建議將此方法應用至地方層級。甚至進而探討個人的生態足跡，將是未來可以重點發展的相關研究之一。根據本計畫之研究結果發現，台北市的人均生態足跡比台灣傳統計算所得的生態足跡還低，計算結果與國際前瞻研究並不一樣，值得後續再深入探討。另外，本計畫發現台北市的「住房碳足跡」計算結果偏低，台灣夏季炎熱需要使用冷氣降低室內溫度，但是總體台北市的電力碳足跡卻只有 0.015 全球公頃／人，這點也值得後續深入研究。

最後，由於糧食相關數據缺乏，因此地區級的食物足跡計算直接借用由上至下的數據，在資料限制下做了相當程度的計算方式調整。本計畫建議相關單位，應在地區層級建立食物消費與生產的相關履歷資料，一方面在糧食安全的意義上，另一方面在食農教育上，都有迫切的需求應用。



## 參考文獻

三陽機車，能源效率表，<http://tw.sym-global.com/showroom/modelenergy/125cc.php>，上網日期：2020/11/12。

中興工程顧問股份有限公司（2012），水庫系統碳足跡與水資源工程溫室氣體排放量評估(1/2)，經濟部水利署水利規劃試驗所出版，上網日期：2020/11/12。

內政部國土測繪中心，國土測繪圖資服務雲，<https://maps.nlsc.gov.tw/>，上網日期：2020/11/12。

公路總局，機動車輛登記數－按縣市別及使用燃料別分查詢條件設定，<https://stat.thb.gov.tw/hb01/webMain.aspx?sys=210&kind=21&type=1&funid=1110008&rdm=1AqcdxjV&fbclid=IwAR2KhEnlFD9xfFrxfgu8laRnjyYGDGWS1hKIVnASvMZFr0qJ664Cct4P4>，上網日期：2020/11/12。

台北市主計處，2018年台北市重要統計數據速報，自來水與天然氣章。  
<https://dbas.gov.taipei/News.aspx?n=7958FE18B0F954AA&sms=AD604EA29C84D91B>，上網日期：2020/11/12。

台北市統計資料庫查詢系統，<https://statdb.dbas.gov.taipei/pxweb2007-tp/dialog/statfile9.asp>，上網日期：2020/11/12。

台北市政府都市發展局，台北市都市發展統計查詢系統，<http://pxweb.udd.gov.taipei/pxweb/dialog/statfile9.asp>，上網日期：2020/11/12。

台北市交通統計查詢系統，臺北市交通統計查詢系統，<http://dotstat.taipei.gov.tw/pxweb2007P/Dialog/>，上網日期：2020/11/12。

台北市政府主計處，臺北市家庭收支記帳調查報告，臺北市主計處-臺北市家庭收支訪問調查報告，  
<https://dbas.gov.taipei/News.aspx?n=783F3F5F4E6C457E&sms=CF3C6E6E7767448F>，上網日期：2020/11/12。

台北市政府民政局，臺北市各行政區最新月份人口數及戶數，臺北市政府民政局中文網站 - 統計資料 - 臺北市各行政區最新月份人口數及戶數，

[https://ca.gov.taipei/News\\_Content.aspx?n=8693DC9620A1AABF&sms=D19E9582624D83CB&s=EE7D5719108F4026](https://ca.gov.taipei/News_Content.aspx?n=8693DC9620A1AABF&sms=D19E9582624D83CB&s=EE7D5719108F4026)，上網日期：2020/11/12。

台北市環境保護局，2018 年廚餘回收現況簡報，臺北市環境保護局 - 廚餘回收資訊 - 廚餘回收現況介紹，  
[https://www.dep.gov.taipei/News\\_Content.aspx?n=D2AB82D610F8791F&sms=222A982296F669B7&s=051EBF238B7EC5EA](https://www.dep.gov.taipei/News_Content.aspx?n=D2AB82D610F8791F&sms=222A982296F669B7&s=051EBF238B7EC5EA)，上網日期：2020/11/12。

台北產經數據，台北市電力總用電量查詢，電力總用電量 Total Power Consumption in Taipei City- 臺北產經資訊網，  
[https://www.taipiecon.taipei/econ\\_obs\\_cont.aspx?MmmID=3001&MSid=1009](https://www.taipiecon.taipei/econ_obs_cont.aspx?MmmID=3001&MSid=1009)，上網日期：2020/11/12。

台北農產運銷股份有限公司，交易行情查詢：單日交易行情查詢 - 臺北農產運銷股份有限公司，<http://www.tapmc.com.taipei/Pages/Trans/Price1>，上網日期：2020/11/12。

台灣自來水公司（2015），台灣自來水公司第七區管理處 104 年度推動節約用水宣導計畫，自來水公司第七管理處。

台灣電力公司（2020），經營實績：統計資料，  
<https://www.taipower.com.tw/tc/page.aspx?mid=43&cid=29&cchk=34db42ba-62b1-4684-9fc8-59881779ac23>，上網日期：2020/11/12。

李永展（2004），邁向永續發展的一種可能，環境資訊中心電子報「可持續性發展專題」。

李永展（2005a），以生態足跡論永續交通，營建知訊，第 270 期，頁 80-87。

李永展（2005b），臺灣台灣生態足跡趨勢之分析與比較，行政院農業委員會九十四年度農業管理計畫，台北：農委會。

李永展（2006），臺灣台灣生態足跡趨勢之分析與比較，行政院農業委員會九十五年度農業管理計畫，台北：農委會。

李永展（2010），邁向永續發展的一種可能：環境空間觀念的引介(上)，環境資訊中心，  
<https://e-info.org.tw/issue/sustain/sustain-00102701.htm>，上網日期：2020/11/12。

李永展（2011），與大自然和諧共存的生態足跡，台灣林業，第 37 卷，第 3 期，頁 22-27。

- 李永展（2013），生態足跡之計算與建制之先期研究。農委會林務局委託管理計畫，台北：農委會。
- 李永展（2013）：生態足跡之計算與建制之先期研究。農委會林務局委託管理計畫，台北：農委會。
- 李永展（2016），生態足跡之跨域比較，經濟前瞻，168期，頁60-63。
- 李永展、吳孟芳（2005a），台北市主觀生活品質之衡量，都市與計畫，第32卷(4)，頁387-420。
- 李永展、吳孟芳（2005b），臺灣台灣生態足跡之計算，第一屆兩岸環境資源與地區發展學術研討會，台北：中國文化大學。
- 李永展、陳安琪（1998a），台中都會區都市永續性之衡量—生態足跡分析法之應用，國立臺灣大學建築與城鄉研究學報，第十期，頁1-17。
- 李永展、陳安琪（1998b），從生態足跡觀點探討臺灣台灣的永續發展，經社法制論叢，第22卷，頁437-465。
- 看守台灣（2007），全球公民團體呼籲「零廢棄零暖化」- 不要骯髒的廢棄物處理技術，看守台灣，<https://www.taiwanwatch.org.tw/node/620>，上網日期：2020/11/12。
- 都市及區域發展統計彙編（2020），國家發展委員會，<https://statistic.ndc.gov.tw/1-1.htm>，上網日期：2020/9/21。
- 陳盛通、張惠婷（2016），影響生態足跡之環境政策因子效果探討，農業與經濟，56(2016)，頁107-139。
- 黃文昌、姜榮煌、洪政偉，2012，廢(污)水處理廠節能規劃與改善以工研院中興院區為例，工業污染防治，第122期，頁47-75。
- 經濟部水利署，自來水用水統計查詢，經濟部水利署各項用水統計資料庫，<http://wuss.wra.gov.tw/waterusage.aspx>，上網日期：2020/11/12。
- 經濟部能源局，各縣市汽車加油站汽柴油銷售統計月資料，[https://www.moeaboe.gov.tw/ECW/populace/content/wfrmStatistics.aspx?type=2&menu\\_id=1300&sub\\_menu\\_id=5691](https://www.moeaboe.gov.tw/ECW/populace/content/wfrmStatistics.aspx?type=2&menu_id=1300&sub_menu_id=5691)，上網日期：2020/11/12。

- 經濟部能源局，能源耗用量與 CO2 轉換表，經濟部能源局(Bureau of Energy, Ministry of Economic Affairs, R.O.C.) 全球資訊網，  
<https://www.moeaboe.gov.tw/ECW/populace/home/Home.aspx>，上網日期：2020/11/12。
- 經濟部能源局，能源產品單位熱值表，<https://reurl.cc/bRvRro>，上網日期：2020/11/12。
- 蘇昭旭（2020），鐵路高架與地下化的醒思，眼底城事「鐵路立體化專題」，  
<https://eyesonplace.net/2020/02/14/13678/>，上網日期：2020/11/12。
- Daly, H. (1990). Commentary: Toward some operational principles of sustainable development, *Ecological Economics*, 2(1990): 1-6.
- Earth Overshoot Day. (2020). Earth Overshoot Day 2020, *Global Footprint Network*, (<https://www.overshootday.org/>), Oct. 5, 2020 (retrieved 2020/12/30).
- Footprint Calculator. (2020). Global Footprint Network, *Global Footprint Network*, (<https://www.footprintcalculator.org/>), Nov. 12, 2020 (retrieved 2020/12/30).
- Fishman, E. (2020), Urban Cycling Institute about urban mobility footprint, (<https://www.facebook.com/urbancyclinginstitute/photos/a.284670935246378/1260925477620914>) (retrieved 2020/12/12).
- Galli, A., Iha, K., Moreno Pires, S., Mancini, M.S., Alves, A., Zokai, G., Lin, D., Murthy, A., Wackernagel, M. (2020). Assessing the Ecological Footprint and biocapacity of Portuguese cities: critical results for environmental awareness and local management, *Cities*, pp.96.
- Galli, A., Kitzes, J., Niccolucci, V., Wackernagel, M., Wada, Y. and Marchettini, N. (2012). Assessing the global environmental consequences of economic growth through the Ecological Footprint: A focus on China and India, *Ecological Indicators*, 17: 99-107.
- Galli, A., Wackernagel, M., Iha, K., & Lazarus, E. (2014). Ecological Footprint: Implications for biodiversity, *Biol. Conserv*, 173, 121-132.
- GFN, foodprintcalculator, [Ecological Footprint Calculator]  
(<https://www.footprintcalculator.org/>) (retrieved 2020/11/12).
- Le, T., Wang, Y., Liu, L., Yang, J., Yung, Y. L., Li, G., Seinfeld, J. H. (2020). Unexpected air pollution with marked emission reductions during the COVID-19 outbreak in China, *Science*, 369 (6504): 702-706, DOI: 10.1126/science.abb7431.

- 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, DOI: 10.3390/su6096170.
- Lin, D., Hanscom, L., Martindill, J., Borucke, M., Cohen, L., Galli, A., Lazarus, E., Zokai, G., Iha, K., Eaton, D. & Wackernagel, M. (2016). *Working Guidebook to the National Footprint Accounts: 2016 Edition*. Global Footprint Network, Oakland.
- Lin, D., Hanscom, L., Martindill, J., Borucke, M., Cohen, L., Galli, A., Lazarus, E., Zokai, G., Iha, K., Eaton, D. & Wackernagel, M. (2018a). *Working Guidebook to the National Footprint Accounts*, Global Footprint Network, Oakland.
- Lin, D., Hanscom, L., Murphy, A., Galli, A., Evans, M., Neill, E., Mancini, M. S., Martindill, J., Medouar, F. Z., Huang, S. & Wackernagel, M. (2018b). Ecological Footprint Accounting for Countries: Updates and Results of the National Footprint Accounts, 2012-2018, *Resources*, 7, 58, DOI: 10.3390.
- Lin, D., Hanscom, L., Martindill, J., Borucke, M., Cohen, L., Galli, A., Lazarus, E., Zokai, G., Iha, K., Eaton, D. & Wackernagel, M. (2019). *Working Guidebook to the National Footprint and Biocapacity Accounts*, Global Footprint Network, Oakland.
- Mancini, M. S., Galli, A., Coscieme, L., Niccolucci, V., Lin, D., Pulselli, F. M., Bastianoni, S., & Marchettini, N. (2018). Exploring ecosystem services assessment through Ecological Footprint accounting, *Ecosyst. Serv.*, 30, 228-235.
- Mancini, M. S., Galli, A., Niccolucci, V., Lin, D., Bastianoni, S., Wackernagel, M., Marchettini, N. (2016). Ecological Footprint: Refining the carbon Footprint calculation, *Ecological Indicators*, 61(2016), 390-403.
- Rees, W. & Wackernagel, M. (2008). Urban ecological footprints: Why Cities Cannot be Sustainable - and Why They are a Key to Sustainability, *Environmental Impact Assessment Review*, 16(4): 537-555.
- Rees, W. (1992) Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out, *Environment and Urbanization*, 4(2): 121-130.
- Ritchie, H. & Roser, M. (2018). *Energy Production & Changing Energy Sources*, Washington, DC, U.S.A: Our World in Data, Island Press.

- Song, M. & Pan, X. (2020) Sustainable marine resource utilization in China: a comprehensive evaluation. *Decoupling Marine Resources and Economic Development in China*, Ch 6: 173-192.
- Świąder, M., Lin, D., Szewrańska, S., Kazak, J., Iha, K., Hoof, J., Belčáková, I. & Altiok, S. (2020). The application of ecological footprint and biocapacity for environmental carrying capacity assessment: a new approach for European cities, *Environmental Science & Policy*, 105: 56-74.
- United Nations Population Fund. (2020). United Nations Population Fund (UNFPA), *United Nations Population Fund*, <https://www.unfpa.org/swop>, Dec. 12, 2020 (retrieved 2020/12/30).
- United Nations Conference on Environment and Development (Earth Summit). (1992) *Agenda 21*, 3-14, Rio de Janeiro, Brazil.
- Wackernagel, M. & Galli, A. (2007). An overview on ecological footprint and sustainable development: A chat with Mathis Wackernagel, *International Journal of Ecodynamics*, 2(1): 1-9.
- Wackernagel, M., & Rees, W. (1996). *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*, British Columbia, CANADA: New Society Publishers.
- Wackernagel, M., Galli, A.; Hanscom, L., Lin, D., Mailhes, L., & Drummond, T. (2018). *Routledge Handbook of Sustainability Indicators*, Routledge International Handbooks, Routledge: Abingdon, UK.
- Wang, B. C., Chou, F. Y., & Lee, Y. J. (2012). Ecological Footprint of Taiwan: A Discussion of its Implications for Urban and Rural Sustainable Development, *Computers, Environment and Urban Systems*, 36(4): 342-349.
- World Commission on Environment and Development. (1987) Energy, *WCED*, 87(6), vol. 17-doc. 149.
- WWF Japan and Global Footprint Network. (2020). Ecological Footprint for Sustainable Living in Japan, *World Wildlife Fund*, <https://www.wwf.or.jp/>, Oct. 5, 2020 (retrieved 2020/12/30).

## 附錄一、第一次專家學者座談會會議記錄

### 第一次專家學者座談會會議記錄

一、時間：2020/10/14

二、地點：中華經濟研究院圖書館 210 研討室

三、與會成員：

中央研究院 鄭明修 研究員

特有生物研究保育中心 方國運 前主任

國立台灣大學農業經濟學系 陳郁蕙 教授

國立台灣大學生物多樣性研究中心 黃靖倫 博士後研究員

四、會議討論：

#### 1. 漁業碳足跡低估

燈火漁業是台灣盛行的漁撈方式之一，在夜晚用發電機，利用魚群趨光特性捕撈，碳足跡排放量相當大；另外，遠洋漁業也是盛行的漁撈方式，航程相當遠，油料佔據相當大的成本，漁業的碳足跡遠比想像的大；最後，養殖場的曝氣設備亦是高耗電量、高碳足跡的捕魚方式。簡而言之，未來的魚場足跡應針對類型多樣的高碳排漁撈方式做修正。

#### 2. 社會溝通論述

生態超限日是錨定生態赤字變化的社會溝通手法之一，但是一般民眾很難「共感」足跡數字與足跡變化的量性意義。建議以日常生活的質性經驗，例如市場買菜的購買力下降，例如買到的魚不只變少，更嚴重的是還變小。這是非常貼近常民生活的論述模式。

#### 3. 綠色供應鏈與綠色資本流

目前國內有關永續生態指標的前瞻研究，討論綠色供應鏈與綠色資本流，生態足跡的計算應做為相關研究的引用指標，建議回顧相關文章。藉此進一步收斂政策意涵。

#### 4. 亞洲農業的特性

當前計算方式以溫帶的歐美為指標，無法反映土地重複利用、複合化利用、高度集約的亞洲樣態特性。例如，所謂的「種植面積」指的是種植面積(兩期稻算 2 倍的種植面積)還是耕地面積(可供種植的總面積)? 為了反映多期種植的特性，台灣會計算「複種指數」(二期稻作為 2)。(按: 根據農委會的農業統計年報，台灣的作物複種指數 **Multiple Cropping Index** 約為 1.2-1.05，工商業縣市普遍低於 1，農業縣市為 1.3-1.6 之間)。最後，農委會主計處擁有比統計年報更多更細緻的資料，希望未來若補助更多經費，應該提送一個反應亞洲農業特性的生態足跡計算方式。

#### 5. 寫作建議

係數轉換的年份 (e.g.  $Y_c=3.4, 2012 \dots Y_c=2.7, 2018$ ) 需要標示出來，應計算一個按照該年份計算方式(參數不同)的版本。另外，2014 版的頁數過都，看得相當辛苦，建議以國際前瞻研究、台灣的資料來源與計算結果綜合呈現即可。

#### 6. 魚場資料來源

有兩個資料來源，經過討論，建議以漁業統計年報為主，資料相對初級，較能反映全貌。

#### 7. 碳排放資料來源

有兩個資料來源，經過討論，建議以經濟部能源局為主，原因是 IEA 的資料來源也是引用能源局的資料。

### 五、會議結論

1. 資料來源統一: 資料歧異問題，經過討論後，建議以漁業統計年報與經濟部能源局的資料為主進行生態足跡之計算。
2. 社會溝通: 嘗試質化論述方式。
3. 報告中討論「複種」指數與亞洲農業的特性。



4. 報告中應標示碳足跡吸收率的係數轉換年份。
5. 力求計算架構、資料來源、係數統一，建議未來以 2000 年後的資料為準即可。
6. 結案報告以前瞻、清晰、簡單為原則。

## 附錄二、第二次專家學者座談會會議記錄

### 第二次專家學者座談會會議記錄

一、時間：2020/11/17

二、地點：中華經濟研究院 522 研討室

三、與會成員：

中央研究院 鄭明修 研究員

特有生物研究保育中心 方國運 前主任

財團法人中華經濟研究院 洪志銘 研究員

財團法人中華經濟研究院 簡毓寧 研究員

國立台灣大學生物多樣性研究中心 黃靖倫 博士後研究員

四、會議討論

1. 有關漁業用地的貿易修正假設:所有魚種之營養密度恆定

目前維持原計算方式，符合資料與計算公式之穩定性。此討論重點為捕撈、養殖漁業，以及肉食、草食、雜食性魚類的餌料轉換係數不同，營養密度也非常不一樣，導致單位面積投入/產出有很大的區別。

2. 社會溝通(1): 過度漁撈的觀點

以漁業捕撈作為切入點，能充分反映 *overshooting* 的問題；以白鯧為例，白鯧是台灣過年熱銷的魚類，大約 30 年前已經供不應求，由於冷凍技術進步，這 20-30 年大多是從國外進口，例如泰國。預先冷藏冰凍販售。現在能捕撈到大型白鯧的機會越來越少，但是國人普遍缺乏一個觀念是只要有錢，不論單價上千上萬，只要能購買到魚就買。第二個例子是馬祖黃魚，以前大約可以長到 200 斤，現在大型的都沒了，由於市場需求，反而加州沿海的魚場成為捕捉黃魚的場域，魚標的價格上看每公斤 4 萬美金，嚴重影響當地生態。接著是牽罟，這項技藝 30 年前台灣仍有 1000 組以上，每次拉上岸有幾百斤，現在全台灣僅剩下觀光用途，不到 10 組，每次拖上

來的漁網只有不到三斤。總結的說，傳統漁業的消亡，可以看出當前過度捕撈的危害。

### 3. 社會溝通(2): 個人生態足跡

林務局曾補助研究區域型的生態足跡，當時有個人生態足跡的抽樣調查，從個人的生活方式出發比較能體現每個人都能做出的貢獻。進一步由個人的資料去換算生態足跡等同幾個台灣、什麼時候是生態超限日。建議使用網站、APP 的方式做抽樣調查，這種自願檢核式的資料收集能拿到相當大量的數據。

### 4. 地區型 EF 計算

相當肯定地區型 EF 計算，一方面討論個人級生態足跡可以作為一地區之精準計算的依據，另一方面，地區型有助於形成國內的環保政策。目前上至下(top-down)的 EF 是國家級，是一種 Global Indicators，做學術比較用途與國際倡議為主。相對地，地區級的 EF 是 Local Indicators，在國內可以形成跨域比較的基礎，應該在每個縣市都做一份，追蹤 10 年就能產生環境政策的影像力。

### 5. 製作參數表

建議同 NFA 一樣，嘗試公布國內地區級的 EF 計算公式、參數表、公式表。並且給予變數的操作性定義。可以先透過翻譯國外研究方法於附錄的方式進行。地區級 EF 計算研究方法上，建議以混和型（農林漁牧建用傳統上至下、碳足跡用下至上的計算方式）的計算方式為主。如果人力與資源允許，可以另外透過 GIS 繪製圈圈圖，體現台灣各大城市過度利用生態資源的狀態。

### 6. 環境政策相關建議

台灣綠能政策 2025 年預計供給 20% 綠電，綠能如何影響碳排放與生態足跡，這點應該列入後續討論之中，包含建成環境中的社區農園、綠建築等，是否應該有其他的計算方式調整。另外，有關汗水排放處理，由於台灣接管率非常低，僅有台北達 8 成以上，多數汗水直接排放到海洋當中造成溶氧力下降是不是進一步影響海洋的碳排吸收？值得後續研究追蹤討論。

### 7. 研究方法建議

建議清楚說明本次研究的標的為 2012-2018。說明 2019-2020 目前尚無國際公式、台灣清楚之資料，為求精確建議以 2012-2018 為主即可。另外，由於過往台灣生態足跡計算上遭遇重大參數修正、國內數據引用有誤情況，建議未來台灣的生態足跡以 21 世紀，也就是 2000-2018 為主即可，這個區段資料來源、參數、研究品質都具有相當水準。

#### 8. 後續討論(1)：疫情影響工業生產卻強化個人消費服務

疫情影響之下，大型工業如航空、交通都減緩排放碳排放量，但是網購與外送這種個人的服務卻顯著上升，應該進行討論。

#### 9. 後續討論(2)：亞熱帶多作農業的區域趨勢

台灣的稻作與農作物大多能 2-3 收，顯示台灣的生物生產力其實被高度低估，若能以台灣為基礎試著進行(亞)熱帶耕地的生產係數修訂，或許能適用至整個季風亞州地區，為生態足跡作出反應區域特性的貢獻。

### 五、會議結論

1. 研究標的設定為 2012-2018 年。
2. 以國際前瞻研究的經驗，嘗試計算地區級生態足跡，建議以台北市為例。