



國立臺灣大學工學院環境工程學研究所

博士論文

Graduate Institute of Environmental Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Doctoral Dissertation

混合型物質流分析量化多空間尺度都市礦

A Hybrid Material Flow Analysis for Quantifying

Multilevel Urban Ore

鄭光利

Kuang-Ly Cheng

指導教授：馬鴻文 博士

Advisor: Hwong-wen Ma, Ph.D.

中華民國 109 年 7 月

July 2020



國立臺灣大學博士學位論文

口試委員會審定書

混合型物質流分析量化多空間尺度都市礦

A Hybrid Material Flow Analysis for Quantifying
Multilevel Urban Ore

本論文係鄭光利君(學號 D02541008)在國立臺灣大學環境工程學研究所完成之博士學位論文，於民國 109 年 7 月 27 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

論文審查委員：

馬鴻文

馬鴻文博士
國立臺灣大學環境工程學研究所教授

李公哲

李公哲博士
國立臺灣大學環境工程學研究所名譽教授

張慶源

張慶源博士
國立臺灣大學環境工程學研究所名譽教授

關蔭德

關蔭德博士
國立臺灣大學環境工程學研究所教授兼所長

呂良正

呂良正博士
國立臺灣大學土木工程學系教授

陳必晟

陳必晟博士
國立成功大學環境工程學系助理教授

指導教授：馬鴻文

所長：關蔭德



謝辭

好的研究通常來自好的問題，感謝恩師馬鴻文博士在 2015 年秋問了我一個好問題，讓我得以在都市礦評估領域生根，成長，茁壯至完成博士學位，希望未來能繼續在循環經濟領域開枝散葉。

論文進度審查、期刊審查和學位考試期間，承蒙本校土木系呂良正博士，地理系朱子豪博士，本所李公哲博士、張慶源博士和闕蓓德博士，成大環工系陳必晟博士，以及未曾謀面的 reviewers 給予諸多寶貴建議，使本論文更臻完善，由衷感謝。

今敝人學業得以完成，必須特別感謝神之推手—必晟學長。感謝您從國際學術前線帶回都市採礦的研究，讓小輩發現這一片都市礦山，至今仍挖掘不盡。感謝您在香港擔任博後研究員時，引介小輩和 Dr. Mark 認識，自此打開我博士生涯的新篇章。感謝 PURE Lab 的成員給我機會和你們一同研究和成長。

感謝在我內心宇宙地表最強的香港理工大學 Dr. Mark 團隊。在 Dr. Mark 的訓練及鞭策之下，獲得了鑑賞的眼光，感激涕零。感謝團隊成員 Emily、Cathy、Kathy、Charmane、Valeria、賽那、王然和銘誠。特別感謝 Cathy 和 Kathy。

感謝王怡心博士楊府一家，感謝廉璞帶來的緣分讓我在 2015 年 ISIE 倫敦研討會和怡心學姊熟識。怡心學姊不論在學術研究、人生課題或是實際的生活支援都提供了我莫大的幫助，當然背後還有強大又帥氣的老爺。對於貴府給予我們的恩情，沒齒難忘，今生有力定加倍奉還。

感謝大頭、紅豆和暖暖一家，特別感謝大哥撥冗出席我的畢業典禮。感謝立命館大學橋本先生和橋本研，感謝劍桑、中川さん和サキさん，是您們豐富了我在日本的生活。感謝馬家班成員，族繁不及備載。感謝大阿姨郭小美和表哥游裕祺，感謝您們當我們的開心果和垃圾筒，分擔我們的憂愁。感謝岐岐感謝宏宏，沒想到上了博士班之後，家裡的情況變得更加嚴峻，感謝有你們撐著。感謝爸媽。

感謝堅強的博論撰寫團隊佳君、桓瑜和 Anny，最後這一哩路真的很難熬，感謝有妳們陪跑。雖然我先了幾步，但請放心，我會繼續在背後支持妳們！！加油！幸福就在不遠了！

最後最後最後，
感謝一直陪伴的妳，和一路走來的我自己。
感謝在我生命中交集的每個人。

如切如磋，如琢如磨。

鄭光利
謹識於 哲學之道
2020 葉月



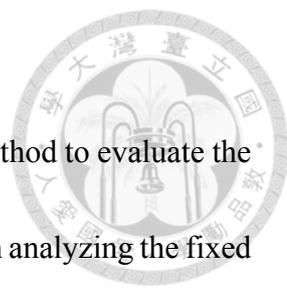
摘要

本研究建立一個混合型物質流分析(hybrid material flow analysis, HMFA)方法，以評估微尺度至大尺度的毛存貨增加量(gross additions to stocks, GAS)。HMFA 運用產業關聯表中固定資本形成和總供給計算存量比例，以評估大尺度之總 GAS。之後根據量體特性將總 GAS 分配至單一量體，得到微尺度的 GAS。HMFA 將物質存量由總體物質流系統中的平衡指標轉變為具有實際存量意義的都市礦指標。為驗證 HMFA 的有效性，本研究分別應用由上而下和由下而上物質流分析評估臺北市和德國的建材 GAS，並和 HMFA 的結果比較。HMFA 的毛存貨增加量可視為較由上而下方法保守的上限。而由下而上方法通常會因為無法取得實地物質強度資料，或是物質強度資料分類不夠明確造成 GAS 低估。HMFA 克服由上而下方法無法評估微尺度 GAS 的限制，和解決由下而上方法高數據依賴的問題，提供一個有效率且合理的評估方法。研究結果顯示臺灣 2001 年、2004 年、2006 年和 2011 年四年平均建材 GAS 為 87 Mton。四年縣市平均建材 GAS 最高者為桃園市 13 Mton，占臺灣平均建材 GAS 15%。臺灣北部目前累積眾多建材存量尚未釋出，建議可以桃園市為中心建立建材循環圈。另一方面為發掘場址尺度的都市礦熱區，本研究收集臺北市 1965 年至 2014 年的建築統計和 GIS 資料，評估累積物質存量。並引用熱區分析發掘大安區和中山區的老建築聚集群，分別為 Zone I 和 Zone II。研究結果顯示至 2014 年臺北市已累積 183 Mton 的建材存量。Zone I 和 Zone II 兩者累積建材存量分別為 181 和 119 kton，面積分別為 0.1 和 0.6 km²。Zone I 物質存量密度較 Zone II 高，具較高的開採效益，不過兩者都市礦組成存在差異，可視物質需求選擇開發場址。本研究量化高空間解析度的都市礦資訊，有助於物質循環規劃與管理，包括資源供需分析、回收路徑和廠址選擇等。未來研究可考量運用 HMFA 和量體生存曲線，建立多空間尺度動態物質供需模型，再配合市場價值進行可行性評估，嘗試對於都市礦循環規劃提出建議。

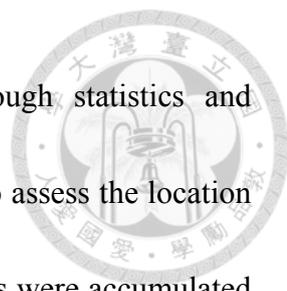
關鍵字：混合型物質流分析、多空間尺度、熱區分析、都市礦、循環經濟



Abstract



This study develops a hybrid material flow analysis (HMFA) method to evaluate the gross additions to stock (GAS) at both micro- and macro-level through analyzing the fixed capital formation and total supply in input-output tables. HMFA turns GAS from a balance indicator in the top-down approach to an indicator with meaningful value in terms of urban ore evaluation. To verify the validity of HMFA, this study compares the developed HMFA with a top-down approach and a bottom-up approach through assessing the GAS of Taiwan and Germany. The quantity of GAS estimated by HMFA is considered as a more conservative upper bound than that by the top-down approach, while underestimation often occurs with a bottom-up approach. HMFA has been proven as an efficient and rational evaluation method which overcomes a key limitation in assessing micro-level GAS by a top-down approach, and solves the data demanding problem of the bottom-up approach for quantifying material stock. HMFA is used to estimate the building GAS in Taiwan from the macro to individual levels in the year 2001, 2004, 2006, and 2011. The average amount of GAS in the above years was 87 Mton, with concrete accounting for 91%. Taoyuan has the highest average amount of GAS among other counties, reaching 13 Mton, and accounting for 15%. Northern Taiwan with abundant material stock could form a building material circle and be centralized in Taoyuan. On the other hand, to evaluate the existence of old building clusters at site-level, material



stock in Taipei City between 1965 and 2014 is assessed through statistics and geographical information systems. Hot spot analysis is introduced to assess the location of resources. The results indicate 183 Mton of construction materials were accumulated in Taipei till 2014. The regions with massive potential urban ore are Da'an (Zone I) and Zhongshan (Zone II) Districts. Zone I (0.1 km²) stored 180 kton of materials; while Zone II (0.6 km²) stored 119 kton of materials. The extraction efficiency of Zone I was found to be higher than that for Zone II owing to the higher material stock density of Zone I. As the composition of the materials are different in Zone I and Zone II, the desired types of resources should also be considered in the evaluation. HMFA provides quantitative data on urban ore with high spatial resolution for enhancing material recycling planning and management, such as material supply and demand analysis, material recycling path planning, and site selection. In the coming future, HMFA and survival curve of objects can be used in building a dynamic material supply and demand model in multilevel, and assessing the feasibility of exploitation with market value in the future to support urban mining planning.

Keywords: hybrid material flow analysis, multilevel, hot spot analysis, urban ore, circular economy

目錄



口試委員會審定書	i
謝辭	iii
摘要	v
Abstract	vii
目錄	ix
圖目錄	xi
表目錄	xiii
重要名詞縮寫	xiv
一、緒論	1
二、文獻回顧	11
2.1 都市礦、循環經濟、工業生態學和物質流分析之關係	11
2.2 物質存量評估方法特性與限制	14
2.3 產業關聯表資料應用於物質流分析之演進	22
三、研究方法	25
3.1 混合型物質流分析(hybrid material analysis)	27
3.2 由上而下方法(top-down approach)	31
3.3 由下而上方法(bottom-up approach)	32
3.4 物質存量空間化方法	33
3.5 熱區分析	34
3.6 研究案例與參數說明	35
四、臺灣建築年增物質存量結果	38
4.1 臺灣多空間尺度建築毛存貨增加量	38
4.2 混合型物質流分析驗證	42
4.3 混合型物質流分析限制	44



五、臺灣建築年增物質存量討論	45
5.1 臺灣多空間尺度建築毛存貨增加量趨勢	45
5.2 混合型、由上而下和由下而上物質流分析計算毛存貨增加量差異	46
六、臺北市累積物質存量結果與討論	48
6.1 臺北市歷年建築屬性	48
6.2 臺北市建築累積物質存量	50
6.3 臺北市建築累積物質存量釋出趨勢	54
6.4 臺北市建材都市礦熱區	55
6.5 臺北市累積建築物質存量不確定性和限制	57
七、結論與建議	59
八、參考文獻	62
附件一、臺灣建築代謝和趨勢	74
附 1.1 臺灣建築代謝	74
附 1.2 臺灣建築代謝趨勢	77

圖目錄



圖 1-1 物質流系統.....	3
圖 1-2 解構物質流系統之淨存貨增加量.....	4
圖 1-3 研究利基.....	8
圖 1-4 研究架構圖.....	9
圖 2-1 世界 1970 年至 2017 年資源開採量.....	12
圖 2-2 聯合國環境規劃署循環經濟模式.....	13
圖 2-3 由上而下方法(top-down approach) (a)EW-MFA 簡化經濟系統；(b)進出流平衡得到 NAS；(c)EW-MFA 經濟系統解構.....	15
圖 2-4 日本 3D-GIS 建築.....	17
圖 2-5 科技公司提供之日本 3D 建築公開資料.....	18
圖 2-6 動態物質流分析示意圖.....	19
圖 2-7 夜間燈光影像(a)南歐和北非；(b)東亞；(c)美國和加拿大部分地區；(d)中東近波斯灣.....	20
圖 2-8 產業關聯表示意圖.....	23
圖 3-1 研究流程圖.....	26
圖 3-2 混合型物質流分析(HMFA)示意圖，以臺灣建築為例.....	29
圖 3-3 物質存量空間化步驟.....	34
圖 4-1 臺灣縣市別四目標年度平均建材存量資訊：(a)建材 GAS；(b)建材 GAS、人均建材 GAS 和建材 GAS 密度。.....	40
圖 4-2 臺北市行政區建築毛存貨增加量.....	41
圖 4-3 臺北市 2001 年、2004 年、2006 年和 2011 年應用 TD、HMFA 和 BU 評估建材存量結果比較.....	42
圖 4-4 臺灣和臺北市 2001 年、2004 年、2006 年和 2011 年應用 HMFA 和 BU 評估建材 GAS 物質別結果與物質總銷售量之比較.....	43

圖 4-5 德國 2010 年應用 TD、HMFA 和 BU 評估建材存量結果比較.....	44
圖 6-1 臺北市建築用途、結構、總樓層數和年齡之關係(a)用途和結構；(b)總樓層數和結構；(c)總樓層數和年齡別結構.....	50
圖 6-2 臺北市建築物質存量空間分布.....	51
圖 6-3 臺北市建築都市礦空間分布(a) 1965-2014；(b) 1975 年；(c) 1985 年；(d) 1995 年；(e) 2005 年；(f) 2014 年.....	53
圖 6-4 臺北市建築都市礦釋出趨勢.....	54
圖 6-5 臺北市建築都市熱礦場 (a) 大安區 Zone I；(b) 中山區 Zone II.....	56
附圖 1-1 臺灣六都建築代謝：(a) 建築建造和拆除總樓地板面積；(b) 建築建造和拆除總樓地板面積百分比；(c) 建築拆除總樓地板面積；(d) 建築拆除總樓地板面積百分比.....	76
附圖 1-2 臺灣 22 個縣市位置、人口、土地面積和其它基本資訊.....	78
附圖 1-3 臺灣建造和拆除樓地板面積.....	79
附圖 1-4 臺灣建造和拆除樓地板面積百分比.....	87

表目錄



表 2-1 全球都市人口百分比統計與預測.....	13
表 2-2 物質存量評估方法特性與限制.....	21
表 3-1 臺灣建築目標物質比例(ρ_j, k).....	30
表 3-2 臺北市建築物質強度(MI).....	37
表 4-1 臺灣建築毛存貨增加量(GAS).....	39
表 6-1 臺北市都市礦熱區資訊.....	57

重要名詞縮寫



BU	Bottom-up approach	由下而上方法
EWS	End-of-life waste from stocks	最終存貨廢棄量
FCF	Fixed capital formation	固定資本形成
GAS	Gross additions to stocks	毛存貨增加量
HMFA	Hybrid material flow analysis	混合型物質流分析
IE	Industrial ecology	工業生態學
IOTs	Input-output tables	產業關聯表
MFA	Material flow analysis	物質流分析
MI	Material intensity	物質強度
MS	Material stock	物質存量
NAS	Net additions to stock	淨存貨增加量
RC	Reinforced concrete	鋼筋混凝土
SEM	Socioeconomic metabolism	社會經濟代謝
SR	Stock ratio	存量比例
SRC	Steel reinforced concrete	鋼骨鋼筋混凝土
SS	Steel structure	鋼結構
TD	Top-down approach	由上而下方法
TS	Total supply	總供給



一、緒論

近兩世紀以來，受機械化和都市化驅使，不斷有大量物質由環境圈被開採至人類圈(anthroposphere)並聚集在都市形成都市礦(urban ore)。都市礦亦即為工業生態學(industrial ecology, IE)社會經濟代謝(socioeconomic metabolism, SEM)中的物質存量(material stock, MS)。將都市既有物質存量運用各種技術開採出來之行為稱都市採礦(urban mining) (Jacobs 1961; Kennedy et al. 2007; Halada et al. 2009; Graedel 2011; Johansson et al. 2013; Cossu and Williams 2015; Lederer et al. 2016)。都市採礦可以替代原生資源開採，是幫助社會轉型循環經濟模式的重要策略之一(Brunner 2007; Pauliuk et al. 2012; Cossu 2013; Cossu and Williams 2015; Simoni et al. 2015; UNEP 2019)。地球自然資源逐漸匱乏，現行線性經濟模式(開採—製造—廢棄)已無法繼續支持人類生活，必須轉型為循環經濟模式才可能永續發展(Frosch and Gallopoulos 1989)。循環經濟概念之一的搖籃到搖籃(cradle to cradle)，與工業生態學旨在建立閉環系統(closed-loop system)以減少不良副產品(by-product)的目標相同(Graedel et al. 1995)。意即整個系統中沒有廢棄物，每個程序的產出物皆為下個程序的投入物(McDonough and Braungart 2010; Korhonen et al. 2018; UNEP 2019)。都市採礦程序和傳統採礦程序相似，包含探礦(prospecting)、探勘(exploration)、開拓(development)和開採(exploitation) (Hartman and Mutmanský 2002)。其中探礦為藉由資料考查，找尋富含都市礦的潛在場址。而探勘則為藉由都市礦的量化和空間化定出範圍，再結合市場價格定出都市礦的價值，最後經由可行性評估決定是否開拓。因此，都市採礦可協助人類圈資源(anthropogenic resources)開發，使物質重新於 SEM 循環，以減少原生資源開採。而擁有很多物質存量的都市很有機會可以透過都市採礦轉型為循環經濟。

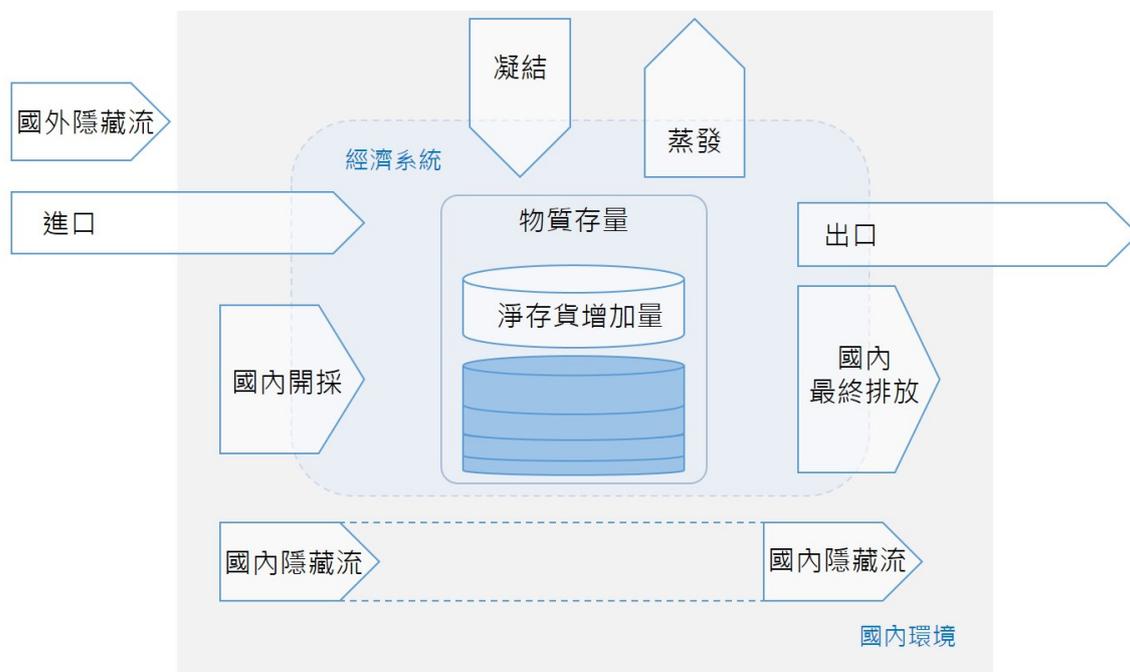
建築是都市中最豐富的物質存量，內含眾多建築材料(後簡稱建材)，包含混凝土、磚、鋼鐵、木頭和鋁等物質(Hashimoto et al. 2007; Tanikawa and Hashimoto 2009;



Hashimoto et al. 2009; Huang et al. 2013; Wang et al. 2016; Tanikawa et al. 2015; Kleemann et al. 2017a)。建築是為滿足人類居住需求而存在，代表都市居民的生存空間，亦象徵著都市的富裕程度(Pauliuk and Müller 2014; Tanikawa et al. 2015)。然而，建築的興造、使用和廢棄過程切實關係著天然資源的投入和環境污染物的排放(Kennedy et al. 2007)。建築在施工階段需要大量建材，這些建材在生產過程中需投入更多砂石、石灰石、黏土、鐵礦、煤礦、矽礦和鋁礦等自然資源，導致天然礦產蘊藏量消耗，亦造成許多環境問題。以混凝土為例，其基本原料為水泥和砂石。水泥在製造過程中會需要大量熱能並排放大量 CO₂、NO_x、SO₂ 和粉塵等污染物，砂石開採將改變地形地貌並造成難以回復的環境生態危機(Khasreen et al. 2009; Zabalza Bribián et al. 2011; Wang et al. 2016; Heeren 2017)。建築興造完成後，資源以使用中的存量(in-use stocks)形式存在於都市代謝系統中(Kapur and Graedel 2006; van Beers and Graedel 2007; Pauliuk and Müller 2014)。相較於建造施工階段，建築使用過程中物質消耗量較少，主要為室內人類活動所需之水、電和天然氣(Zabalza Bribián et al. 2011; Ibn-Mohammed et al. 2013; Heeren 2017)。當建築使用週期結束或有重大災害發生時，既有建材存量也將轉變為未來的營建廢棄物量，成為都市的環境負荷(Tanikawa et al. 2014; Miatto et al. 2017; García-Torres et al. 2017)。由此可見物質存量在資源和環境面皆可能產生顯著影響，必須系統化瞭解都市中的物質存量，盡可能將物質存量循環再利用，以減少當代資源的消耗和未來廢棄物的產生。

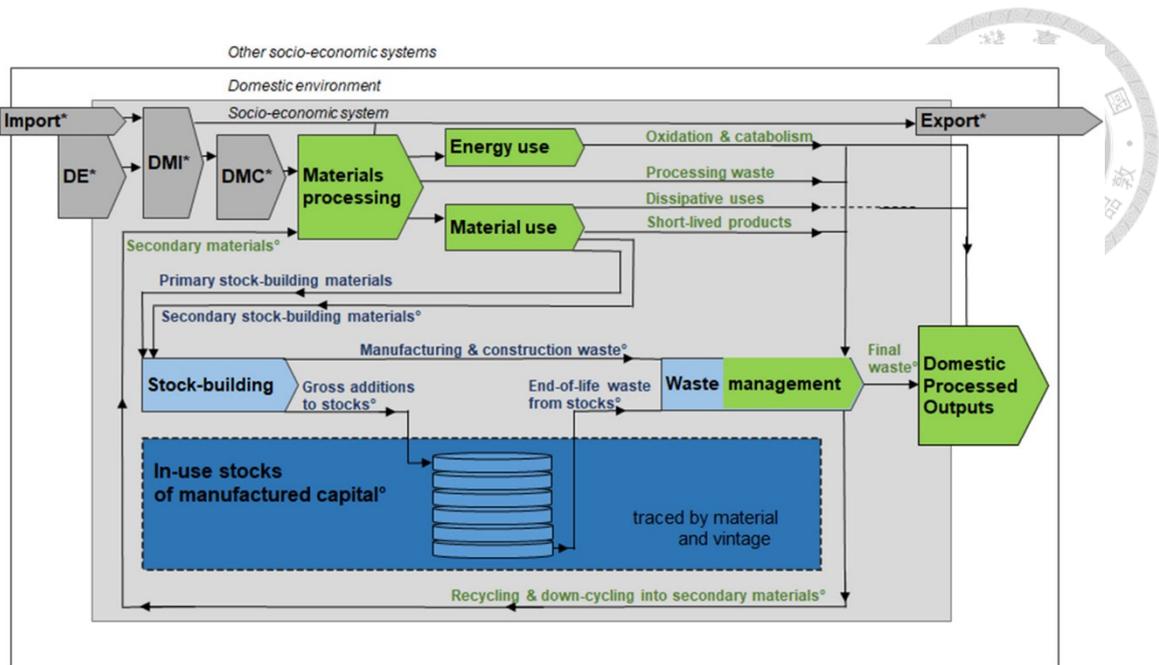
物質存量為物質流系統(圖 1-1)中淨存貨增加量(net additions to stock, NAS)多年累加的結果。物質流分析(material flow analysis, MFA)為工業生態學中社會經濟代謝的核心方法學。MFA 為基於質量守恆定律，系統性分析目標物質在特定時間和空間範圍內的流向和流量(Baccini and Brunner 1991; Brunner and Rechberger 2016)。最早 MFA 是被開發來關注物質的最終流向(final sink)以降低環境負荷。近年 MFA 常被用來分析人類圈和自然界資源和價值的流布，探尋轉型循環經濟的契機(Pauliuk et al. 2012; Bocken et al. 2017; Schiller et al. 2017; Stephan and Athanassiadis

2018; Werner et al. 2018)。MFA 對於系統內各流向的計算方式和指標已發展相當完整，唯獨缺乏對於物質存量的評估方法(Tanikawa and Hashimoto 2009; Tanikawa et al. 2015; Kleemann et al. 2017a)。因為累積的物質存量通常已經超出 MFA 的時間邊界。NAS 在物質流系統中被歸於平衡指標，透過固定時間範圍內(通常為一年)流入量和流出量差值得到。強制平衡的結果，隱含許多不確定性，因為廢棄物排放量的統計數據通常不完整且品質低(Kleemann et al. 2017b; Wiedenhofer et al. 2019)。實際上 NAS 應為毛存貨增加量(gross additions to stocks, GAS)和最終存貨廢棄量(end-of-life waste from stocks, EWS)之差值(圖 1-2)。GAS 為新增至存量(stocks)之物質，即為在系統時間邊界內，仍在經濟系統中使用的存量(in-used stocks)。經年累積的 in-used stocks 即為物質存量。EWS 則為在系統時間邊界內，從經年累積 in-used stocks 中被移除的物質，即為可透過都市採礦獲得的物質。EWS 可藉由分析過去累積 GAS 的存活率(survival rate)得到。然而目前的 MFA 皆無法直接估算 GAS 和 EWS (Wiedenhofer et al. 2019)。



資料來源：Matthews et al. (2000); Fishman et al. (2014)

圖 1-1 物質流系統



物質流入量、存量和流出量模型(material inputs, stocks and outputs, MISO-model)系統綜覽。灰色項目為 EW-MFA 之指標，綠色項目為透過延伸計算得到輸入動態流入量驅動(input-driven)模型(藍色項目)的資料。標記*號之項目為來自定期更新的 EW-MFA 資料庫。初級存量建築材料(primary stock-building materials)為外生模型輸入。標記°號為模型內生變數。
資料來源：Wiedenhofer et al. (2019)

圖 1-2 解構物質流系統之淨存貨增加量

都市採礦規劃所需基礎資訊包括 GAS 的量、組成、空間屬性和年齡(Chen and Graedel 2015; Tanikawa et al. 2015; Koutamanis et al. 2018)。目前國際間多用由上而下方法(top-down approach, TD)或由下而上方法(bottom-up approach, BU)評估不同尺度和物質種類的物質存量。聯合國環境規劃署(The United Nations Environment Programme, UNEP)、經濟合作暨發展組織(Organization for Economic Cooperation and Development, OECD)、歐盟和日本等國際組織和國家長期運用 TD 觀測全球或國家尺度的物質流，包括 NAS，以作為資源永續策略擬定重要依據(Wiedenhofer et al. 2019)。Fishman et al. (2014)運用 TD 和物質壽命機率分布(lifespan probability distribution)評估日本和美國 1930 年至 2005 年累積 4 類物質存量，人均物質存量分別為 375 ton/cap 和 310 ton/cap。Tanikawa and Hashimoto (2009)運用 BU 量化 2004 年 Salford Quays 與和歌山市中心 3 種量體和 7 種物質以上累積的物質存量，人均物質存量分別為 111 ton/cap 和 247 ton/cap。Lederer et al. (2016) 和 Kleemann



et al. (2017a)運用 BU 量化維也納 2013 年的地鐵網絡(subway network)和建築共 30 種累積的物質存量，人均物質存量分別為 7.4 ton/cap 和 210 ton/cap。以上研究皆為運用 BU 量化微尺度和多種類的累積物質存量。Nguyen et al. (2018)運用 BU 量化越南道路 2003 年至 2012 年累積的 4 種物質存量，人均物質存量為 29 ton/cap。Schiller et al. (2017)同時運用 TD 和 BU 分別量化德國 2010 年新增和累積的 22 種物質存量，人均年新增物質存量為 10 ton/cap，人均物質存量為 347 ton/cap。Nguyen et al. (2018)和 Schiller et al. (2017)為少數將 BU 用在大尺度的研究。彙整上述研究可知，TD 多為評估大尺度(macro-level)單年度的 NAS，近期有學者運用 TD 結合動態資料評估多年度大尺度的 NAS。BU 則多為用於微尺度(micro-level)多年度累積的物質存量評估。

TD 為依循經濟系統物質流會計(economy-wide material flow accounts, EW-MFA)之架構，由上而下(top-down)分析經濟體內之流向和流量，尺度通常為整個國家。EW-MFA 為透過計算進出系統的物質量，建立指標以瞭解國家整體物質使用情形。EW-MFA 指標分為輸入、消費、輸出和平衡四類，NAS 被歸於平衡指標。NAS 可以用來粗估每年新增的物質存量，但是在 NAS 內的經濟活動被視為黑盒子，無法提供 GAS 和 EWS，以及個別產品尺度物質存量資訊。國際間有部分研究(Hashimoto et al. 2009; Schoer et al. 2013; Chen and Graedel 2015; Schiller et al. 2017; Yokoi et al. 2018)嘗試將產業關聯表(input-output tables, IOTs)中貨幣流(financial flow)結合產品價格，得到個別產品的物質流。然而歷年產品價格蒐集不易，且產品價格易受國際情勢波動，可能使此方法適用性受限。此外相同產品不同販售通路存在商業差距，可能會增加分析結果的不確定性。

BU 以特定時間和區域內之最終產品(end of life, EoL)作為盤查標的。由下而上(bottom-up)將區域內所有量體(object)乘以物質強度(material intensity, MI)，即可得該區域的物質存量。BU 被廣泛應用於微尺度的 MS 評估，可提供高空間解析度的個別物質存量資訊(Tanikawa et al. 2015; Kleemann et al. 2017a)。甚至可以透過微尺



度的 MS 聚合得到大尺度的 MS (Schiller et al. 2017; Nguyen et al. 2018)。不過 BU 的資料需求量會隨著尺度上升而增加，導致評估困難。尤其是物質強度，必須經由專家問卷或文獻回顧得到。資料盤查過程耗費高人力和時間成本。盤查結果得到的物質強度多為拼湊而來，不甚完整，造成 MS 低估或是無法評估。取得物質強度最好的方式為現地調查，但並非每個國家都有此類一級資料(primary data) (Chen and Graedel 2015; Kleemann et al. 2017a; Schiller et al. 2017; Gontia et al. 2018)。若 MS 為由一年度的累積量體資料透過 BU 推估，則無法得知各年度的 GAS，無法準確估算 EWS。Gontia et al.(2018)建議必須建立量體和物質強度資料庫以解決 BU 高數據依賴(data demanding)的問題。然而資料庫建置非短時間可以完成，可能無法解決各國尋求循環經濟轉型的殷切需求。因此需要一個數據需求量小，結果又不失準確的 GAS 評估方法。

本研究之目的為建立一個低數據需求且適用於多空間尺度的混合型物質流分析(hybrid material flow analysis, HMFA)方法(圖 1-4)。本研究從 top-down 的角度蒐集臺灣總建材量以及 2001，2004，2006 和 2011 年 IOTs 等總體統計資料。經由總建材投入量乘以存貨比例(stock ratio)計算得到總建材存量。再根據由 bottom-up 得到各建築的總樓地板面積(total gross floor area, TGFA)和結構資料，將總建材存量分配至各單一建築，得到微尺度的建材存量資訊。本研究應用 HMFA 評估全臺灣、各縣市和臺北市各建築的建材存量。評估的建築材料包含混凝土、磚、鋼鐵、木頭和鋁。另外為驗證 HMFA 的有效性，本研究分別應用 TD、HMFA 和 BU 評估臺北市和德國的物質存量。物質流分析結果通常難以驗證，透過 TD 和 BU 的結果互相驗證是唯一方法(Yang and Kohler 2008)。Schiller et al.(2017)亦應用此方法，將 TD 的結果視為上限，驗證德國物質存量分析結果。

另一方面，為發掘場址尺度(site-level)的都市礦熱區(熱礦場)本研究取得臺北市詳細建築統計和地理資訊系統(geographical information systems, GIS)資料，以評估臺北市近 50 年累積的建材存量基礎資訊和熱礦場。統計資料包括建築建造起迄

日期、結構、用途、總樓地板面積、地上樓層數、地下樓層數和地址等。本研究亦將建築結構、總樓層數和年齡進行關係分析。



在瞭解都市礦基礎資訊後，本研究欲更進一步瞭解，近期在哪個區域有較高開採潛力。都市礦必須於使用週期結束時才可能被開採(Brunner 2011; Lederer et al. 2016)，都市礦空間密度愈高愈具開採效益，都市礦量大並非代表開採潛力高。因此若有老建築密集成群，即代表該區具有較高的開採潛力。Lederer et al. (2016)亦曾以地鐵網絡 MS 使用狀態和壽命作為開採可能性的判斷依據。為此，本研究引用熱區分析(hot spot analysis, HSA)之 Getis-Ord's $G_i^*(d)$ 統計檢定方法(Getis and Ord 1992)評估研究案例中是否存在有老建築聚集群。

HSA 是一種空間自相關分析方法，其目的是為瞭解某事件的影響程度是否會造成空間群聚的現象，且是否會連帶提高附近區域的影響程度(Odland 1988)，而滿足前述兩條件之區域即為熱區。熱區並非代表此區域有較高數值，而是有較顯著的屬性。Getis-Ord's $G_i^*(d)$ 是一種區域式群聚檢定(local clustering test)，除了可檢定研究對象是否有空間群聚之外，亦可檢定出其空間聚集的區域和強度。此方法常應用於犯罪學和流行病學等社會科學研究。犯罪事件於地理空間並非隨機分布，而是有高度群聚趨勢，亦即犯罪熱區(crime hotspots)。Getis-Ord's $G_i^*(d)$ 此類區域式群聚檢定常應用於探知區域內的犯罪行為是否具有空間聚集之情況以及定位聚集區域，以使警政單位妥善分配警力資源(Eck et al. 2005)。傳染病或醫療事件於地理空間的分布，亦具有高度群聚趨勢。應用 Getis-Ord's $G_i^*(d)$ 檢定此類研究對象之熱區，可使衛生單位投入重點防疫工作或分配醫療資源(Ahmad et al. 2015; Kao et al. 2017)。本研究認為建築建設發展亦具有群聚趨勢，透過 Getis-Ord's $G_i^*(d)$ 檢定是否存在有老建築聚集群，可使都市採礦更具效益。

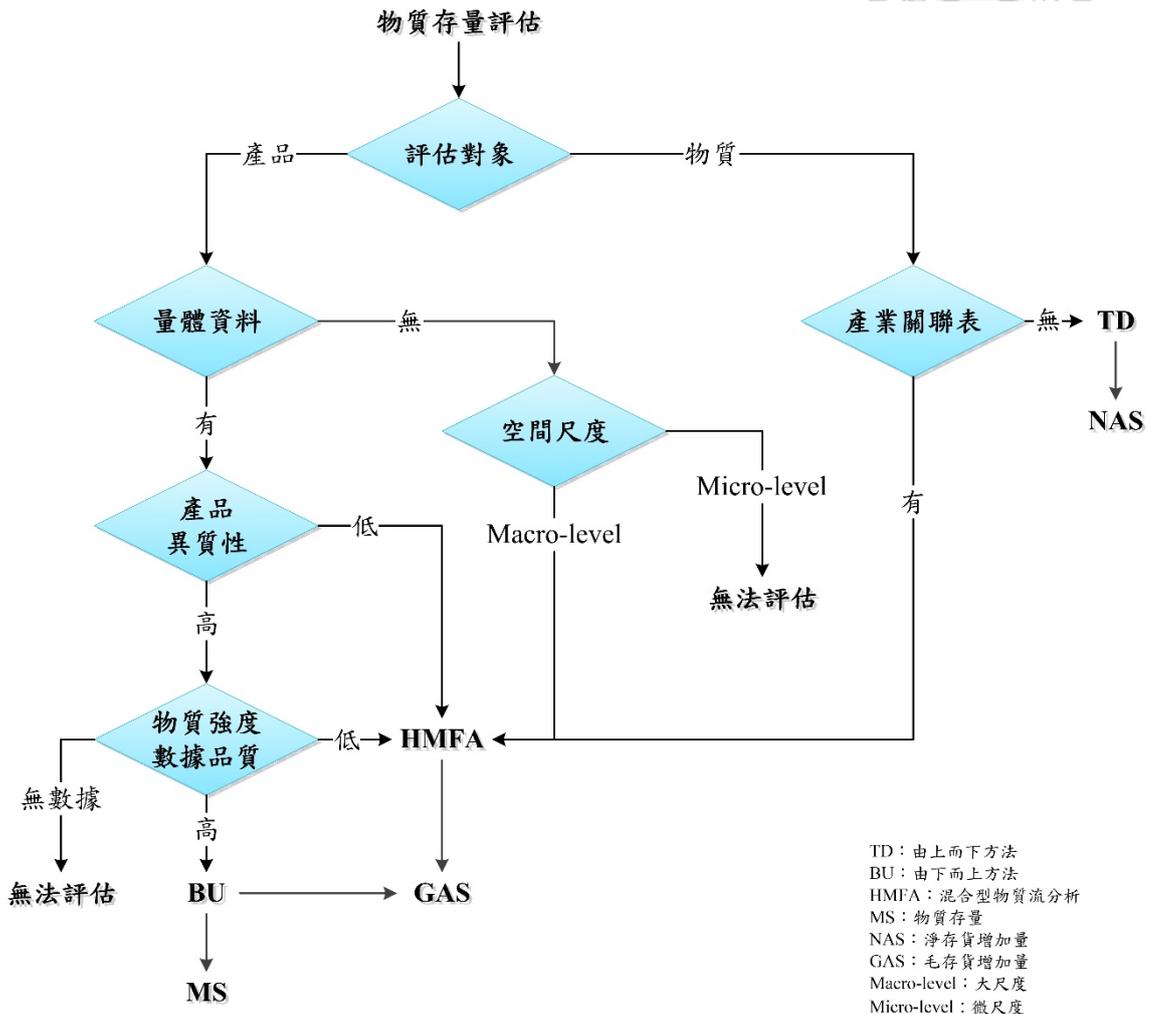


圖 1-3 研究利基

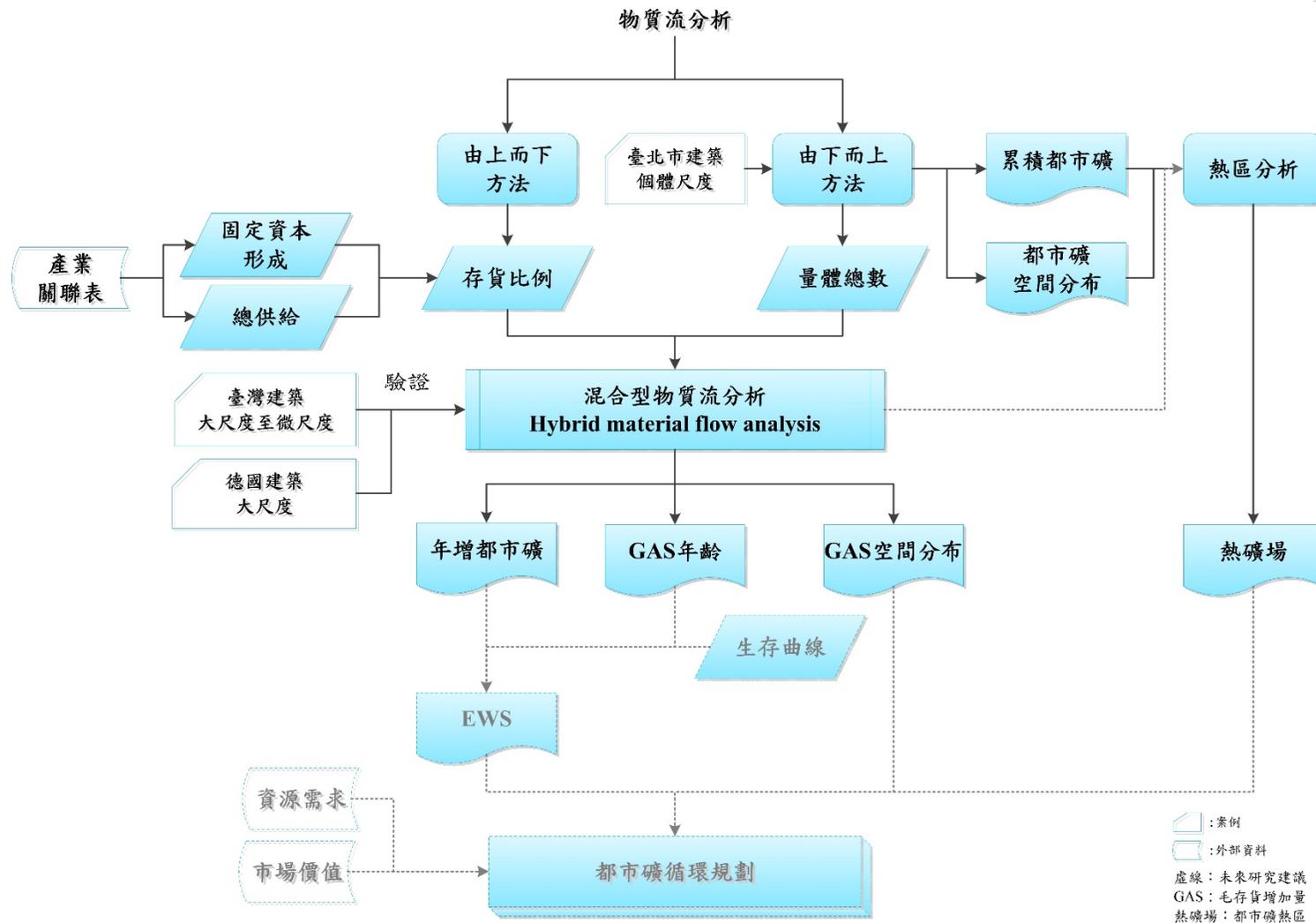


圖 1-4 研究架構圖





二、文獻回顧

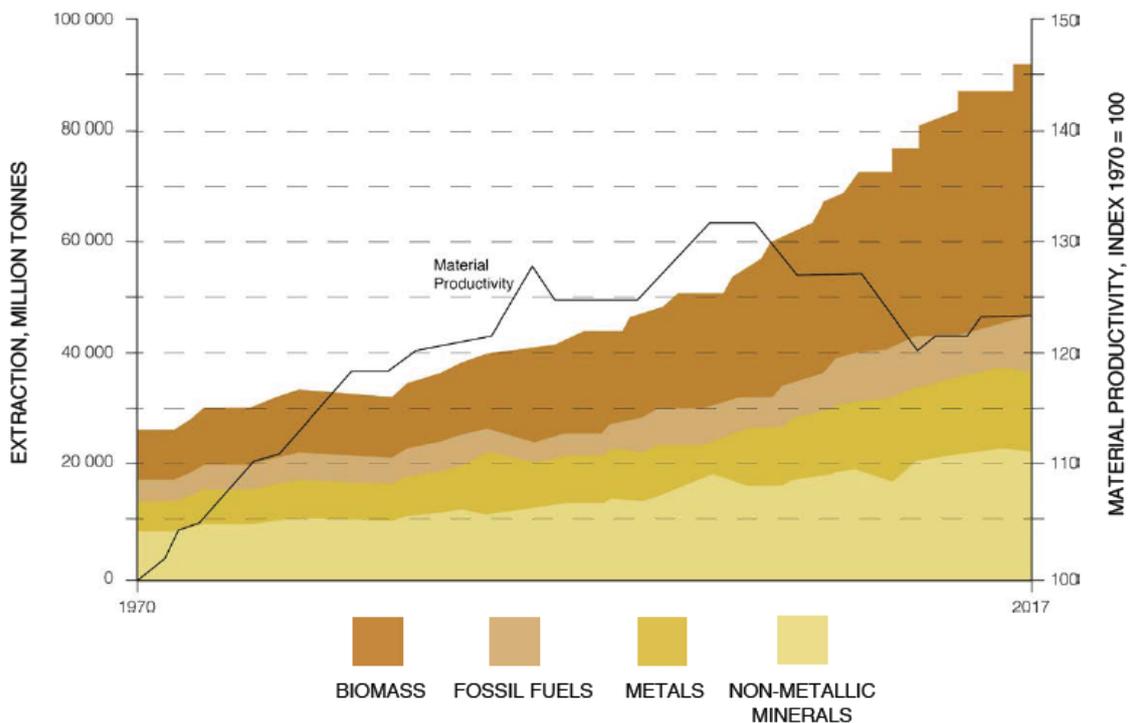
2.1 都市礦、循環經濟、工業生態學和物質流分析之關係

都市礦的形成主要是受到機械化和都市化兩大驅動力影響，機械化使物質得以被大量開採，都市化使物質聚集在都市中。根據國際資源委員會(International Resource Panel, IRP)報告指出，2017 年全球一年開採將近 900 億噸的物質到人類圈(圖 2-1)。而未來至 2050 年全球年物質開採量可能將超過 1,800 億噸(IRP 2017)。聯合國評估全球都市化趨勢(表 2-1)，至 2018 年世界 55%的人口居住在都市，並存在 33 個千萬人口等級的巨型都市(megacities)，占世界總人口 7%。至 2050 年全世界將會有 68%的人口居住在都市(United Nations 2019)。物質使用的足跡，依循著人類文明社會發展的軌跡。由 IRP 和聯合國的報告推論，全世界至今應累積有一半以上的物質被使用來滿足都市居民的生活需求。其中，使用壽命超過一年的物質，將在都市中形成都市礦，亦即為 SEM 中的物質存量。

都市採礦為將都市既有物質存量運用各種技術開採出來之行為，可以協助將線性經濟重塑(reshaping)為循環經濟。線性經濟重塑的方式(圖 2-2)有循環設計(reduce by design)、拒買(refuse)、適量購買(reduce)、再使用(reuse)、修復(repair)、整修(refurbish)、再製造(remanufacture)、重新利用(repurpose)和回收再利用(recycle)。(UNEP 2019)。都市採礦屬於圖中最外圍的重新利用和回收再利用迴圈，也就是最後的重塑閉環手段。都市採礦程序包含探礦、探勘、開拓和開採(Hartman and Mutmansky 2002)。探礦和探勘即為藉由資料盤查，瞭解都市中最終產品(end of life, EoL)¹可能的所在區域，並評估最終產品的總物質量、明確位址和經濟價值。

¹ 最終產品(end of life)亦有循環經濟專家稱之為使用終止產品(end of use)，如圖 2-2。這些專家認為從循環經濟角度，當消費者不再使用這些產品時，應該要設法將產品回收再利用，讓物質再次進入循環圈中。因此，專家們認為沒有壽命終止，只有使用終止。本研究所述之最終產品皆等同於前述使用終止產品(UNEP 2019)。

工業生態學和循環經濟主旨皆在建立如自然生態系統般的閉環系統(Graedel et al. 1995; McDonough and Braungart 2010; Korhonen et al. 2018; UNEP 2019)。因此工業生態學的方法學可適用於循環經濟的研究(Frosch and Gallopoulos 1989; Bocken et al. 2017)。物質流分析為工業生態學中社會經濟代謝的核心方法學，可以系統性地量化特定時間和空間範圍內的流向和流量。MFA 早年用於追蹤物質最終流向以降低環境負荷，近年常用於探尋循環經濟轉型契機。本研究亦以物質流分析作為都市礦評估方法學開發的基礎。都市礦基礎資訊包括 GAS 的量、組成、空間屬性和年齡(Chen and Graedel 2015; Tanikawa et al. 2015; Koutamanis et al. 2018)。傳統物質流分析無法解決結果空間解析度低和方法數據依賴性高的問題，僅能提供部分都市礦基礎資訊。下節將回顧現行物質存量評估方法的特性與限制。



資料來源：UNEP (2020)

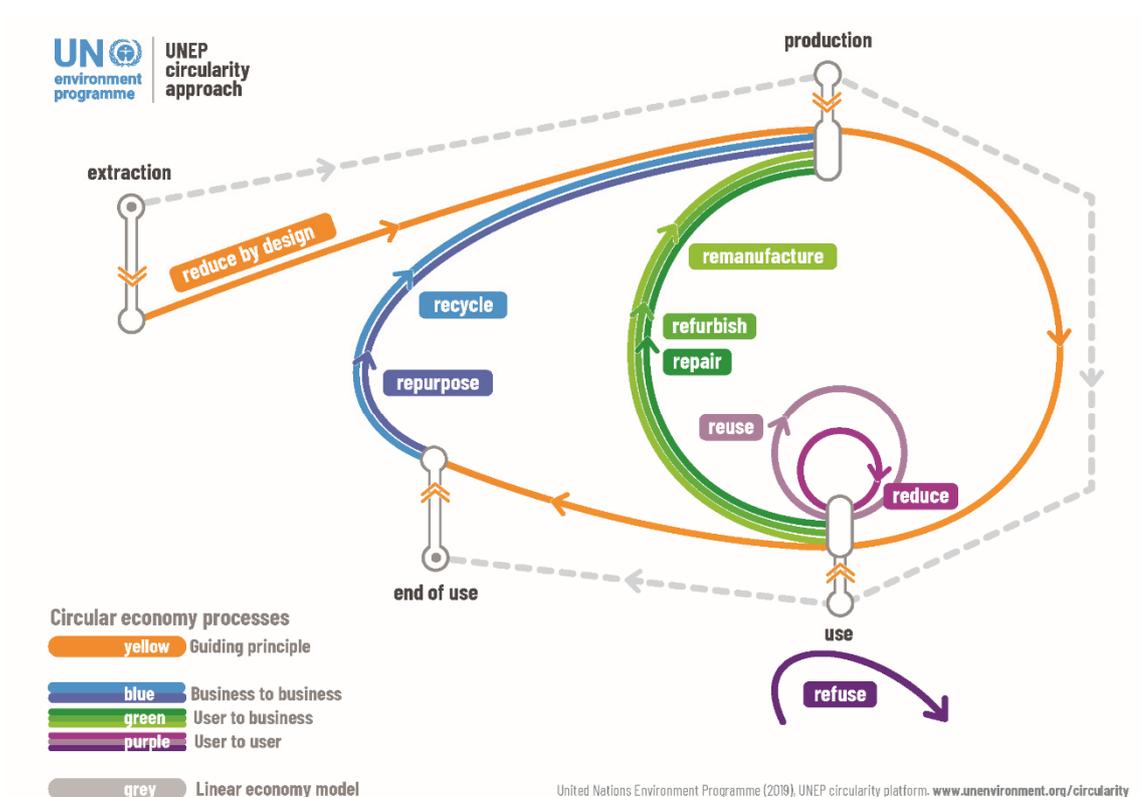
圖 2-1 世界 1970 年至 2017 年資源開採量



表 2-1 全球都市人口百分比統計與預測

	1950	1970	1990	2018	2030	2050
世界	29.6	36.6	43.0	55.3	60.4	68.4
高度開發區域	54.8	66.8	72.4	78.7	81.4	86.6
低度開發區域	17.7	25.3	34.9	50.6	56.7	65.6

單位：% 資料來源：United Nations (2019)



資料來源：UNEP (2019)

圖 2-2 聯合國環境規劃署循環經濟模式



2.2 物質存量評估方法特性與限制

為系統性地預防和減輕物質使用對環境造成的負面影響，Baccini 與 Brunner 於 1991 年提出物質流分析(material flow analysis, MFA)，運用質量守恆定律，確保系統內物質流向和流量的完整性。透過物質流分析可以瞭解元素(substance)、物質(material)、能源(energy)和現金(cash)流動的路徑(Kennedy et al. 2007; Fischer-Kowalski et al. 2011; Lederer et al. 2014)。為增加 MFA 結果跨年度和跨國的可比性(comparability)，世界資源研究所(World Resources Institute, WRI)建構經濟系統物質流帳(economy-wide material flow accounts, EW-MFA)，以及數項物質流指標(Matthews et al. 2000)。此 EW-MFA 架構和物質流指標，可提供世界各國和國際組織永續資源管理的重要資訊依據，權衡物質使用對環境和經濟的影響(Wiedenhofer et al. 2019)。例如第 12 項聯合國永續發展目標²(Economic and Council 2017)，OECD 綠色成長(green growth)和提升資源生產力(material productivity)(OECD 2015, 2019)，UNEP 和 IRP 年度全球資源使用評估報告(IRP et al. 2011; UNEP et al. 2016)，以及歐盟(European Commission 2018)和日本(Ministry of the Environment Japan 2020)等國家的循環經濟行動方案。

工業生態學研究者們致力於將 EW-MFA 發展成為大尺度的通則方法，EW-MFA 使用之原始資料(raw data)多來自於國家級標準化的統計年報(Matthews et al. 2000)。EW-MFA 將進到經濟系統的流向簡化為一個黑盒子，只關注當年度(t)的流入量(material inputs)和流出量(material outputs)(圖 2-3a)。淨存貨增加量(net additions to stocks, NAS)為系統強制平衡的結果(圖 2-3 圖 b)，隱含許多不確定性(Fischer-Kowalski et al. 2011; Wiedenhofer et al. 2019)。實際上流入量應該再進一步被分為使用後，直接排放至環境的流出量，以及使用後進入物質存量(material stock)累積的

² 第 12 項聯合國永續發展目標(Sustainable development goal 12, SDG 12)：負責的消費和生產(responsible consumption and production)

毛存貨增加量(gross additions to stocks, GAS) (圖 2-3c)。而流出量應該再進一步被分為使用後，直接排放至環境的流出量，以及從過去累積物質存量廢棄的最終存貨廢棄量(end-of-life from stocks, EWS)。GAS 和 EWS 兩者的差值即為 NAS。經濟系統簡化和流出量資訊缺乏的結果，使 EW-MFA 至今仍無法評估 GAS 和 EWS(Moriguchi and Hashimoto 2016; Wiedenhofer et al. 2019)。缺乏 GAS 和 EWS 資訊將使物質流分析對於都市採礦規劃支援受限。

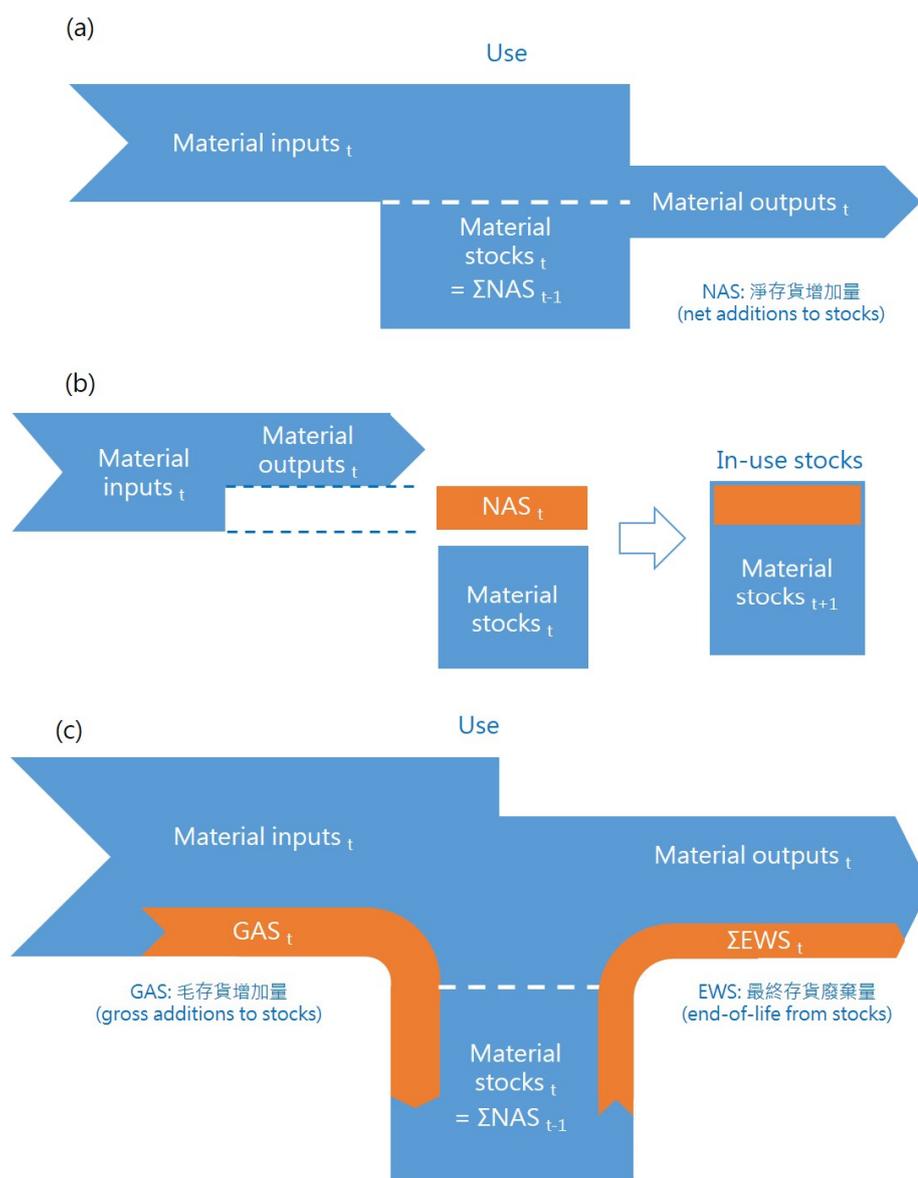


圖 2-3 由上而下方法(top-down approach) (a)EW-MFA 簡化經濟系統；(b)進出流平衡得到 NAS；(c)EW-MFA 經濟系統解構

Tanikawa and Hashimoto (2009)和其它學者(Lederer et al. 2016; Kleemann et al. 2017b; Nguyen et al. 2018)為解除 EW-MFA 由上而下(top-down)評估的限制，提出由下而上(bottom-up)物質存量評估方法。Bottom-up 方法為以特定時間 t 和空間內的最終產品(end-of-life, EoL)作為盤查標的。將系統範疇內所有量體 $INV_{i,t}$ (依量體特性設定單位，如建築樓地板面積為 m^2 和鐵軌長度為 m 等)，依量體種類 i 乘以物質種類 m 的物質強度 $MI_{m,i,t}$ (mass/unit，如建築混凝土物質強度 $mass/m^2$ 和鐵軌鋼物質強度 $mass/m$)得到物質存量 MS (mass)，如式 1 所示(Tanikawa and Hashimoto 2009)。根據量體的時間狀態，運用 bottom-up 方法的計算結果可分為年增物質存量(意同 GAS)，或累積物質存量。

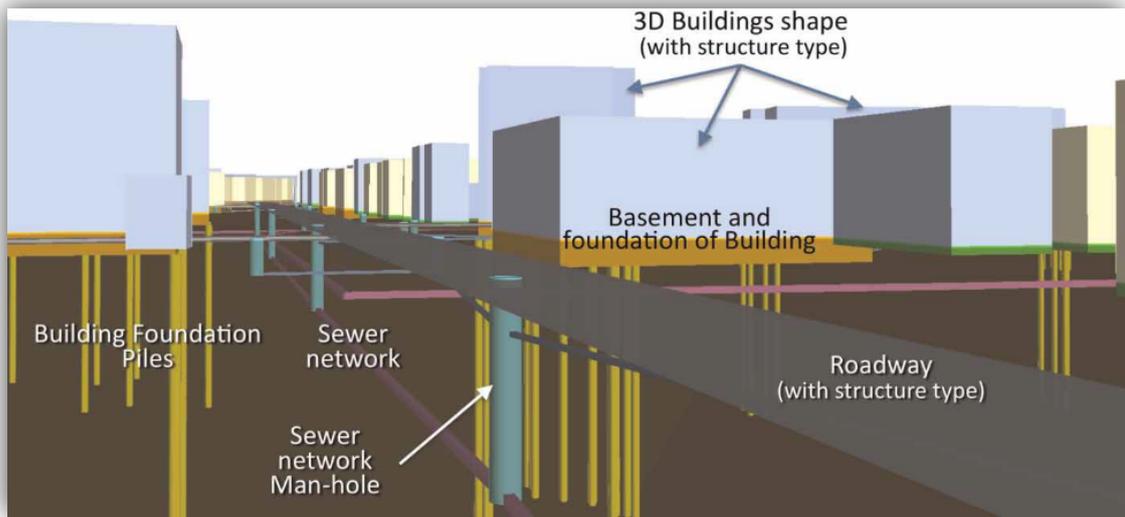
$$MS_{m,i,t} = INV_{i,t} \times MI_{m,i,t} \text{-----} (1)$$

Bottom-up 方法之量體資料來源多為政府統計年報或是透過 GIS 分析。GIS 分析多應用於建築量體評估，例如將政府建管單位提供之建物相關資料，透過 GIS 建立 4D-GIS 建物圖層，計算建物體積(Tanikawa, 2009; Tanikawa, 2015)。或是應用 GIS 分析科技公司所提供之 3D 建物圖像公開資料(open data)(Taguchi et al. 2012)，皆可獲得空間化的建築量體資料，如圖 2-4 和圖 2-5。此外目前市面上已存在將無人機記錄之航攝資料，轉換處理形成點雲資料，提供 3D 建物建模之商業化軟體，有助於高數據品質之建築量體資料取得。

Bottom-up 方法之物質強度資料取得相較量體資料困難。物質強度資料取得方式包括現地盤查、專家問卷和文獻回顧，過程耗費高人力和時間成本。大部分國家無現地盤查的一級資料，必須透過專家問卷或是文獻回顧克服此限制。物質強度資料通常為零散或是不足的，數據品質較量體資料差，為 bottom-up 方法不確定性的主要來源(Kleemann et al. 2017b; Wiedenhofer et al. 2019)。近期有學者嘗試將 bottom-up 方法結合建築資訊模型(building information modeling, BIM)解決物質強度資料關

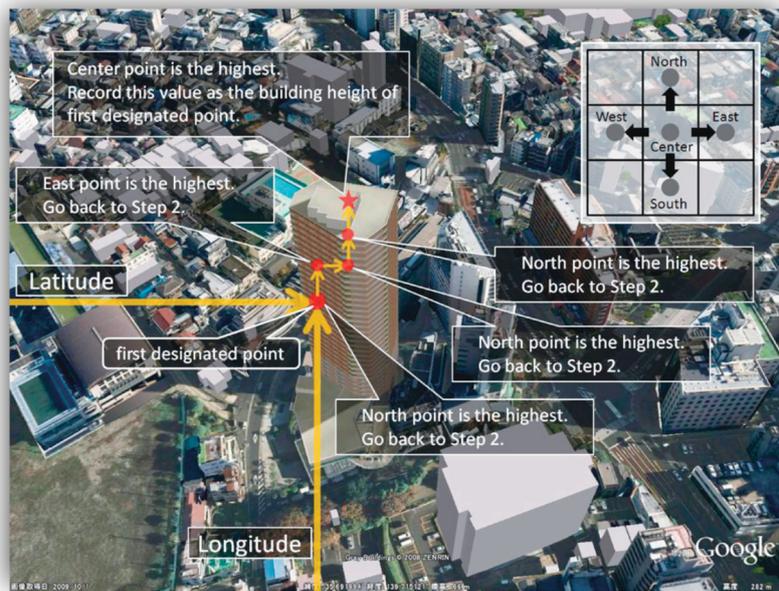
如的問題(Honic et al. 2019; Gupta et al. 2020; Santos et al. 2020)。然而建物的 BIM 存在隱私權、智慧財產權和安全性等限制，個案資料取得困難，無法大規模地評估。

囿於數據依賴度高的限制，bottom-up 方法多應用於微尺度的案例評估。微尺度物質存量聚合亦可取得城市級或國家級的評估結果，但隨著尺度上升，資料需求亦同步上升，應用 bottom-up 方法評估大尺度案例將難以執行。多空間尺度的物質存量資訊，可供不同層級的決策者規劃物質循環策略或都市採礦行動方案。Top-down 方法和 bottom-up 方法皆傾向於提供單一尺度的物質存量分析結果，無法全面支援都市採礦規劃。另外 bottom-up 方法不需流入量和流出量即可計算物質存量，但也因此無法和 top-down 方法計算之流入量和流出量整合。



資料來源：Tanikawa and Hashimoto (2009)

圖 2-4 日本 3D-GIS 建築



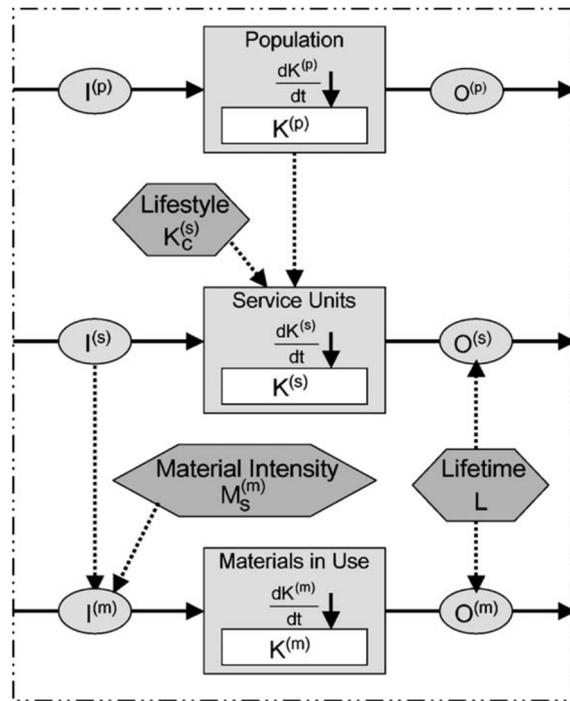
資料來源：Taguchi et al. (2012)

圖 2-5 科技公司提供之日本 3D 建築公開資料

前述 top-down 和 bottom-up 方法皆屬於靜態評估方法，Müller (2006) 和部分學者 (Pauliuk et al. 2012; Huang et al. 2013) 提出動態物質流分析 (dynamic material flow analysis, DMFA)，解決 EW-MFA 經濟系統內程序不明的問題。DMFA 之理論基礎為假設累積在經濟系統中的物質存量皆為滿足人類的需求，由社會和經濟因子驅動。DMFA 採用系統動力學 (system dynamic, SD) 方法，建立由人口和富裕程度等社會經濟因子驅動產品需求的動態模型，如圖 2-6 所示。獲得產品需求量後，再納入產品壽命曲線 (lifetime distribution) 評估流出經濟系統的產品量，最後結合物質強度得到物質存量和流出量。此類方法必須明確瞭解各個驅動因子和量體之間的關係，計算較靜態評估方法複雜 (Turner et al. 2011)。DMFA 多應用於大尺度的評估案例，未來可結合靜態物質流分析結果，推估微尺度物質的供給和需求。

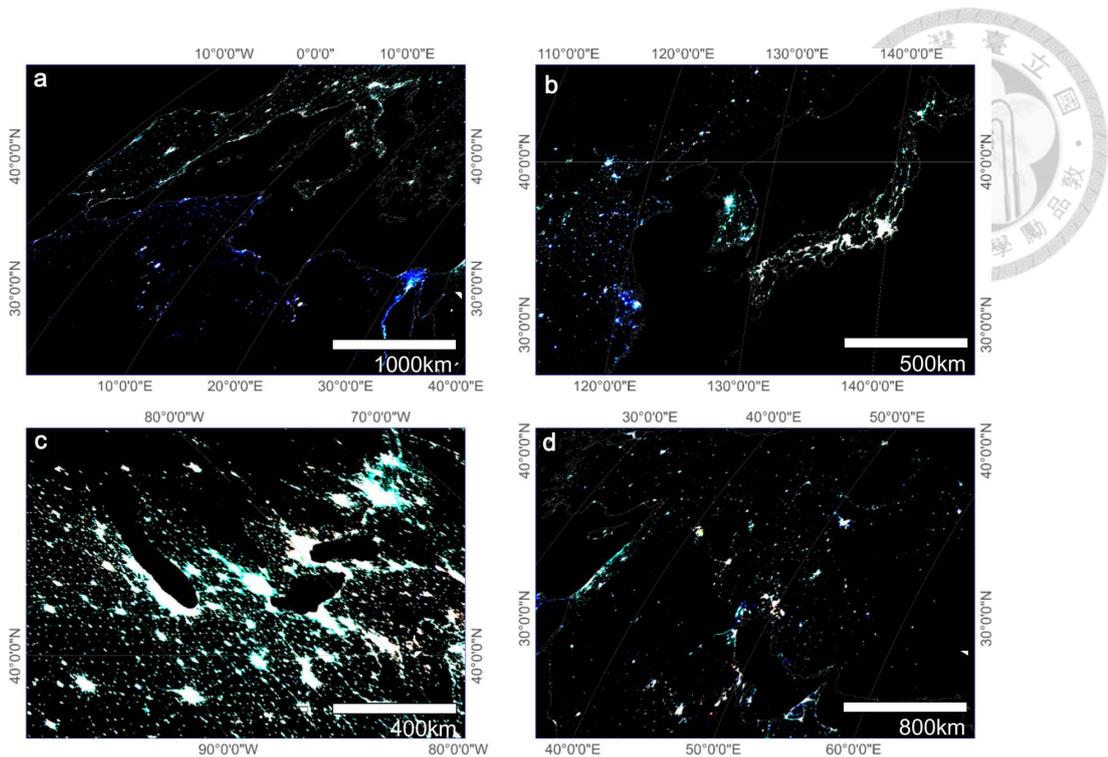
在靜態和動態物質流分析範疇外，Takahashi et al. 於 2009 年提出應用遙測衛星影像推估物質存量的方法 (簡稱遙測方法)，可定期大範圍監測國家累積的物質存量。此類方法之理論基礎建立於夜間燈光 (圖 2-7) 與人口和經濟活動高度相關，而物質存量與人口和經濟活動高度相關 (Hattori et al. 2014)。遙測方法藉由歷史夜間

燈光影像(nighttime light images)和物質存量建立迴歸關係式，之後再由夜間燈光影像推估未知的物質存量達到動態監測物質使用之目的(Taguchi et al. 2012; Liang et al. 2014; Yu et al. 2018)。此方法之評估結果準確度取決於歷史物質存量資料，空間解析度最高為都市層級，且無法明確得知每年新增物質存量。遙測方法適合量體資料缺乏地區，概略評估區域內累積物質存量。或是在國家物質存量歷史資料充足的背景下，常態監測物質使用之情形。



資料來源：Müller (2006)

圖 2-6 動態物質流分析示意圖



資料來源：Yu et al. (2018)

圖 2-7 夜間燈光影像(a)南歐和北非；(b)東亞；(c)美國和加拿大部分地區；(d)中東近波斯灣

靜態 top-down 和 bottom-up 的物質存量評估分類方法，顯然不適用於多方向性動態物質流分析。2019 年 Wiedenhofer et al. 提出根據方法使用的外生變數，將靜態和動態的 MFA 分為流入量(inflow-driven)驅動和存量(stock-driven)驅動。若方法使用之外生變數為流入量，存量為透過內生計算得到即為流入量驅動方法(inflow-driven approach)。若方法使用之外生變數為存量，流入量為透過內生計算得到則為存量驅動方法(stock-driven approach)。

TD、BU 和 HMFA 三種方法的分類為緣自評估起點的不同。TD 為由進到經濟體的總物質流入量開始，透過和流出量的平衡得到淨存貨增加量(NAS)。BU 為由微尺度的物質存量評估結果加總，得到整個研究區域的累積物質存量(MS)或毛存貨增加量(GAS)。HMFA 為同時由進流和量體出發，得到多空間尺度的 GAS。TD、BU、HMFA 和 DMFA 的方法特性與限制整理於表 2-2。

彙整上述物質存量評估方法文獻，本研究提出之 HMFA 利基於 BU 的高數據依賴以及 TD 經濟系統簡化之限制(圖 1-3)。HMFA 結合產業關聯表的固定資本形成和總供給資料解決 TD 無法評估 GAS 的問題，並且透過 TD 得來的大尺度 GAS 降低 BU 資料需求(圖 1-4)。在產品異質性低時，HMFA 不需物質強度資料即可評估 GAS。產品異質性高時，HMFA 需要使用物質強度資料校正，但 HMFA 的物質強度數據品質要求較 BU 低。關於產業關聯表資料應用於物質流分析之演進將於下節詳述。

表 2-2 物質存量評估方法特性與限制

	TD	BU	HMFA	DMFA
評估結果	NAS	MS 或 GAS	GAS	GAS
結果解析度	多為大尺度	多為微尺度	大尺度至微尺度	多為大尺度
結果空間屬性	無	可	可	可
評估物質種類	多為單一物質	多種	多種	多種
產品種類	物質導向	多樣	多樣	物質導向
物質組成	無法提供	可提供	可提供	可提供
資料屬性	物理量	物理量	物理量和貨幣量	物理量
量體資料	不需要	需要	需要	不需要
物質強度	不需要	需要	不一定需要	不需要
壽命資料	需要	不需要	不需要	需要
其它資料	流入量和流出量	無	流入量、流出量和 IOTs	社會經濟因子
運算複雜度	簡易	簡易	中等	複雜
評估起點	進流	量體	進流和量體	進流或量體
流入量驅動/ 存量驅動	流入量驅動	存量驅動	流入量驅動	流入量驅動或 存量驅動
相關研究	Hashimoto et al. (2009); Fischer-Kowalski et al. (2011); Fishman et al. (2014); Schiller et al. (2017)	Tanikawa and Hashimoto (2009); Tanikawa et al. (2015); Lederer et al. (2016); Kleemann et al. (2017a)	本研究	Chen and Graedel (2012); Pauliuk et al. (2012); Krausmann et al. (2017); Wiedenhofer et al. (2019)

TD：由上而下方法；BU：由下而上方法；HMFA：混合型物質流分析；DMFA：動態物質流分析；MS：物質存量；NAS：淨存貨增加量；GAS：毛存貨增加量；IOTs：產業關聯表

2.3 產業關聯表資料應用於物質流分析之演進



MFA 發展沿革是由 Baccini 與 Brunner 於 1991 年運用物質流描述人類圈代謝 (metabolism of anthroposphere)，開啟物質流盤查方法與模型之濫觴(Baccini and Brunner 1991)。之後歐盟統計局發展 EW-MFA 檢視國家經濟系統物質輸入和輸出，以及分析歷年流量之變化(Matthews et al. 2000; Fischer-Kowalski et al. 2011; Fishman et al. 2015)。只是經濟系統內部程序之間關係不明，使 EW-MFA 規劃管理策略支援能力受限(Tanikawa et al. 2015; Wiedenhofer et al. 2019)。隨著經濟統計資料愈趨豐富，MFA 開始導入產業關聯分析的概念，探究社會需求對物質流動的影響。至此，IOTs 仍尚未被運用至物質流盤查模型。直到 Stahmer, Kuhn and Braun (1996, 1997, 1998)提出實體投入產出模型(physical input-output table, PIOTs)，始將 IOTs 資料應用於 MFA 中(Ayres and Ayres 2002)。過去 MFA 研究多著眼於流向流量關係(Tanikawa et al. 2015; Wiedenhofer et al. 2019)，IOTs 常用於輔助 MFA 中輸入、輸出、進口和出口之流量評估，並未用於評估 NAS 或物質存量。例如將產業中間交易貨幣量透過產品價格轉換為物質量，用於 MFA 輸入和輸出流量評估(Hashimoto et al. 2009; Schoer et al. 2013; Chen and Graedel 2015; Schiller et al. 2017; Yokoi et al. 2018)。

產業關聯表亦稱投入產出表(input-output tables, IOTs)，由美國經濟學家 Wassily Leontief 於 1936 年首先提出。用以陳示一國在一定期間內(通常為一年)經濟活動的總成果，如圖 2-8 所示，嗣後聯合國將之納入國民經濟會計制度內(Executive Yuan 2015)。IOTs 依評價基礎不同分為購買者價格、生產者價格和國產品等交易表。購買者價格為購買者由生產者或商業購入商品，此商品運達其手中或生產場所之價格。生產者價格即為購買者價格去除各商品運銷差距(國內運費、商業差距和加值型營業稅)之價格。國產品則是在生產者價格基礎上，將進口品和國產品分別統計(Executive Yuan 2015)。生產者價格交易表已弭平各產品之商業差距，較能切實反應產品交易情形，為行政院主計處建議經濟分析研究者使用(Executive Yuan 2015)。



產業關聯表中固定資本形成(fixed capital formation, FCF)為指各產業(含政府部門)及對家庭服務之民間非營利機構生產者購買或自行生產之各種耐久財(土地除外), 惟須扣除二手貨及廢損物品之銷售額(Executive Yuan 2015)。根據國民經濟會計(System of National Accounts, SNA)規定耐久財為指耐用期間在一年以上之耐久性財貨。耐久財種類繁多, 諸如: 住宅房屋、非住宅房屋(如廠房、校舍等)、其他營建工程(如道路、機場等之建築工程)、土地改良與耕地及果園之開發、運輸工具、機器設備、種畜與役畜及乳牛, 以及智慧財產(包括研究發展、電腦軟體及礦藏探勘)等。其中各項營建工程所包括之未完工程亦作固定資本形成處理(Executive Yuan 2015)。

	1...	j	...n	中間需要	民間消費	政府消費	固定資本形成	存貨變動	出口	最終需要	總需要 總供給	進口
1	X_{11}	X_{1j}	X_{1n}	W_1	H_1	G_1	F_1	T_1	E_1	F_1	X_1	I_1
⋮				⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
i	X_{i1}	X_{ij}	X_{in}	W_i	H_i	G_i	S_i	T_i	E_i	F_i	X_i	I_i
⋮				⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
n	X_{n1}	X_{nj}	X_{nn}	W_n	H_n	G_n	S_n	T_n	E_n	F_n	X_n	I_n
中間投入	$Y_1 \dots$	Y_j	$\dots Y_n$	W								
原始投入	$O_1 \dots$	O_j	$\dots O_n$	O								
投入合計	$X_1 \dots$	X_j	$\dots X_n$	X								

X_{ij} 為由 i 產業投入 j 產業的總額; Y_j 為所有產業對 j 產業之投入總額; O 為所有部門之原始投入總額; O_j 為 j 部門的原始投入總額; X 為所有部門之國內生產總額; X_i 為 i 部門的產出總額; X_j 為 j 部門的總投入總額; W_i 為 i 部門的中間需要合計; H_i 為 i 部門投入之民間消費總額; G_i 為 i 部門投入之政府消費總額; S_i 為 i 部門固定資本形成總額; T_i 為 i 部門存貨變動總額; E_i 為 i 部門出口總額; I_i 為 i 部門進口總額; F_i 為 i 部門投入之最終需要總額

圖 2-8 產業關聯表示意圖



經本節文獻探討後瞭解，IOTs 中固定資本形成之統計定義與本研究物質存量之定義相似，皆為表示長時間存在經濟體中的耐久財。且 IOTs 統計為依製造或施工進度記錄，可降低跨年度生產的耐久財存量估算誤差。再者，IOTs 之生產者價格交易表包含進口統計資料，與本研究範疇相符。因此，本研究嘗試以生產者價格交易表之總供給和固定資本形成資料構成存量比例參數，解決物質係數取得不易造成都市礦評估受限的問題。

三、研究方法



本研究之研究流程首先為界定評估區域，其次為蒐集基礎統計數據、生產者價格交易表與文獻進行量體總數、物質總量、存量比例和不同量體種類目標物質比例之計算(圖 3-1)。之後量體總數可透過量體種類分類，若量體種類間物質組成比例差異不大，此過程可省略。而物質總量和存量比例相乘可得區域內之總物質存量，後續應用目標物質比例計算不同量體種類之總物質存量，並依單一量體特性比例分配，即可得區域各量體之物質存量。最終建立全量體時空屬性。為驗證 HMFA 方法的有效性，本研究分別應用 top-down 和 bottom-up 方法評估案例的 GAS 進行差異分析。另一方面為發掘場址尺度的熱礦場，本研究用運 bottom-up 評估案例的累積物質存量，再結合熱區分析找尋案例中之老建築聚集群。

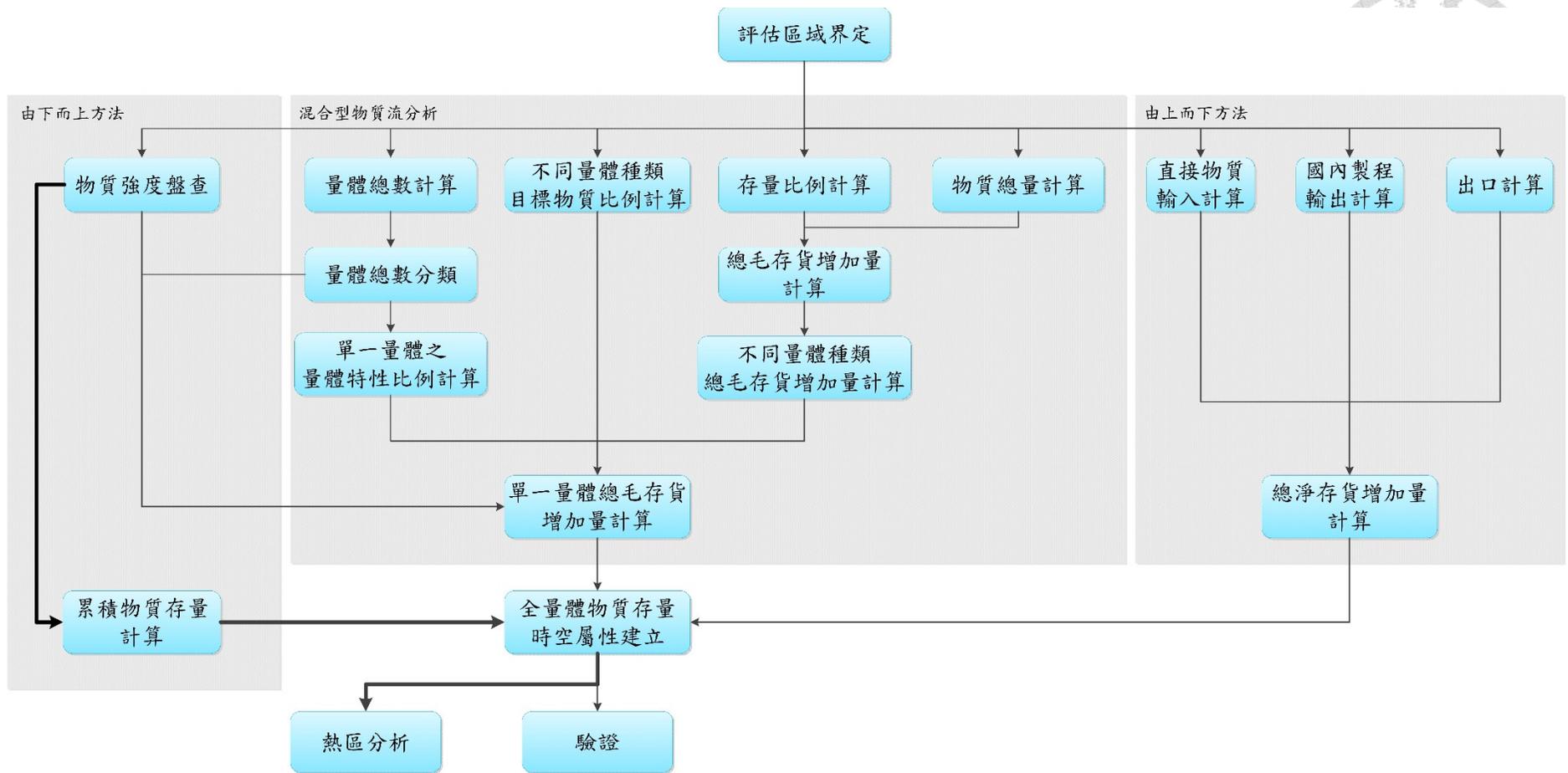


圖 3-1 研究流程圖



3.1 混合型物質流分析(hybrid material analysis)

本研究運用 HMFA 計算 t 年量體 i 物質 j 的物質存量 $MS_{i,j,t}$ (ton)，量體 i 可為建築、公共工程、汽車或機械設備。根據 bottom-up 盤查得到的量體資料，可以將 $MS_{i,j,t}$ 解析至種類 k 單一量體 l 尺度 $MS_{i,j,k,l,t}$ 。單一量體 l 為表示單一棟建築、單一條鐵路、單一輛汽車或單一台機械設備。當量體 i 異質性較大時，將使用種類 k 標示，例如將建築依不同結構分類為 SS(鋼結構)，SRC(鋼骨鋼筋混凝土)和 RC(鋼筋混凝土)。

HMFA 的評估步驟如方程式 2-6 所示。首先由政府總體統計資料或產業統計年報取得 t 年進入目標區域範圍內之量體 i 物質 j 物質投入總量 $MD_{i,j,t}$ (ton)。接著將 $MD_{i,j,t}$ 乘上 t 年量體 i 的存量比例(stock ratio) $SR_{i,t}$ ，得到當年度 t 該量體 i 的總物質存量 $MS_{i,j,t}$ (ton) (式 2)。最後將 $MS_{i,j,t}$ 乘上 $AL_{j,k,l,t}$ 得到單一量體 l 物質 j 的物質存量 $MS_{i,j,k,l,t}$ (ton) (式 4)。 $AL_{j,k,l,t}$ 為由量體種類 k 的目標物質比例 $\rho_{j,k}$ 和量體特性 $P_{k,l,t}$ (m^2 或 m^3)組成。關於 $AL_{j,k,l,t}$ 的詳細資訊將於分配因子(allocation factor)章節說明。

式 3 之 $FCF_{i,t}$ (dollar)和 $TS_{i,t}$ (dollar)分別為 t 年生產者價格交易表量體 i 所屬部門之固定資本形成(fixed capital formation) (dollar)和總供給(total supply) (dollar)。式 5 之 $\rho_{j,k}$ 為量體 i 種類 k 中目標物質 j 比例占全量體 i 種類比例之比值，例如鋼結構(SS)和鋼骨鋼筋混凝土(SRC)鋼鐵含量比例為 2 : 1，則 $\rho_{steel,SS}$ 為 2/3， $\rho_{steel,SRC}$ 為 1/3。 $P_{k,l,t}$ 為 t 年單一量體 l 種類 k 的量體特性，例如單一鋼結構建築之總樓地板面積(m^2)或汽車排氣量(c.c.)。

若無物質 i 物質 j 的物質總量 $MD_{i,j,t}$ ，必須藉由物質 j 的物質總量 $MD_{j,t}$ 乘上物質 j 部門的中間需要比例(intermediate demand ratio, $IDR_{j,i,t}$)。 $MD_{j,t}$ (ton)為 t 年物質 j 的總投入量，可由政府總體統計資料或產業統計年報得到。 $IDR_{j,i,t}$ (dollar)計算如式 6 所示，將物質 j 投入到量體 i 所屬部門的中間需要 $ID_{j,i,t}$ (dollar)除以物質 j 的中間需要合計 $IDS_{j,t}$ (dollar)減去物質 j 投入到自身所屬部門的中間需要 $ID_{j,j,t}$ (dollar)。扣



除 $ID_{j,j,t}$ 為由於自身部門的貨幣流動通常為來自同一個產品的買賣 (Myers et al. 2018)。雖然有貨幣的交易，但質量可能會重覆計算，因此必需扣除以免高估。

以評估臺灣 2011 年(t)單一 SS(k)建築(l)的鋼鐵(j)存量 $MS_{i,j,k,l,t}$ 為例說明 HMFA 評估步驟。建築(i)在 IOTs 編製中屬於營建部門。首先透過鋼鐵公會統計年報(Shih 2016)取得 2011 年臺灣營建部門鋼鐵(j)使用量($MD_{i,j,t}$)。接著乘上由 2011 年生產者價格交易表營建部門資料計算得到之建築存量係數($SR_{i,t}$)，得到臺灣建築鋼鐵總存量($MS_{i,j,t}$)。最後將建築鋼鐵總存量($MS_{i,j,t}$)依據 SS 建築結構(k)鋼鐵含量比例($\rho_{j,k}$)和($P_{k,l,t}$)樓地板面積(m^2)分配至每個建築，得到臺灣 2011 年單一建築(l)的鋼鐵存量 ($MS_{i,j,k,l,t}$)。圖 3-2 為以臺灣建築為例的 HMFA 示意圖。本研究蒐集之資料有限，僅臺北市可分析至單一建築尺度，其它縣市之評估結果為縣市尺度。

$$MS_{i,j,t} = MD_{i,j,t} \times SR_{i,t} \text{-----} (2)$$

$$SR_{i,t} = \frac{FCF_{i,t}}{TS_{i,t}} \text{-----} (3)$$

$$MS_{i,j,k,l,t} = MS_{i,j,t} \times AL_{j,k,l,t} \text{-----} (4)$$

$$AL_{j,k,l,t} = \frac{\rho_{j,k} \times P_{k,l,t}}{\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^m \rho_{j,k} \times P_{k,l,t}} \text{-----} (5)$$

$$IDR_{j,i,t} = \frac{ID_{j,i,t}}{(IDS_{j,t} - ID_{j,j,t})} \text{-----} (6)$$

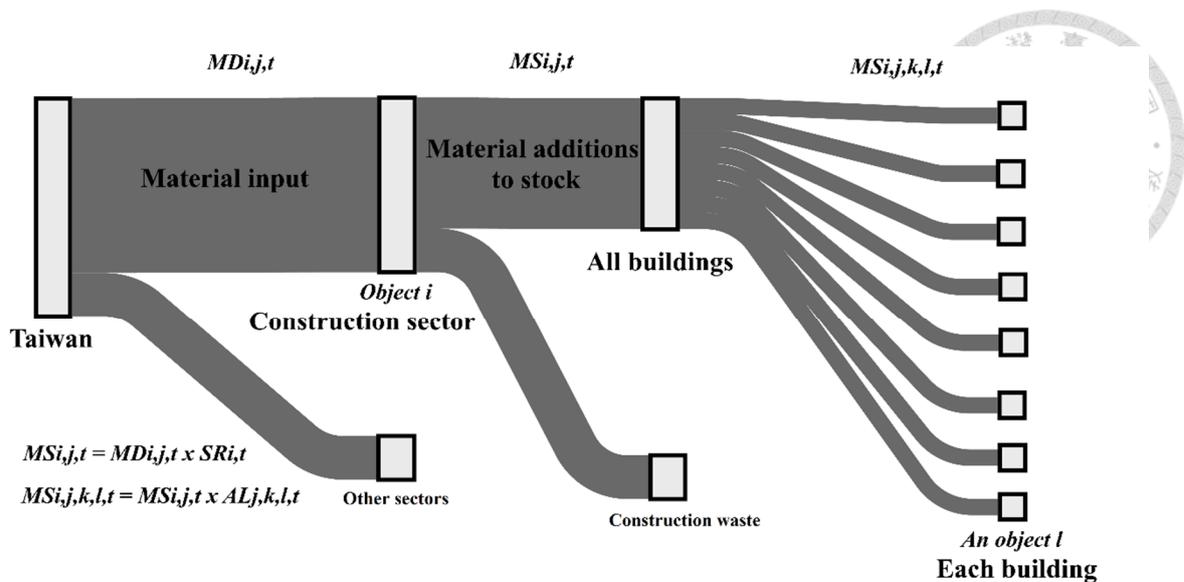


圖 3-2 混合型物質流分析(HMFA)示意圖，以臺灣建築為例

1. 分配因子(allocation factor)

$AL_{j,k,l,t}$ 為分配因子，由目標物質比例 $\rho_{j,k}$ 和量體特性 $P_{k,l,t}$ 組成。基本上 $MS_{i,j,k,l,t}$ 為直接依量體特性分配，但部分產品異質性較大，物質存量 $MS_{i,j,t}$ 的分配受到產品種類 k 影響，必須經由 $\rho_{j,k}$ 校正。例如建築的混凝土、磚、鋼鐵和木材用量受建築結構的影響，必須使用 $\rho_{j,k}$ 調整物質存量分配。 $AL_{j,k,l,t}$ 為由物質強度 $MI_{j,k}$ 比例關係式 (式 7) 和物質存量 $MS_{i,j,k,l,t}$ 關係式 (式 8) 整理而來，推導過程如式 7 至式 11 所示。 $MI_{j,k}$ 為物質強度 (ton/m²)，表示單位樓地板面積 $TGFA_k$ (m²) 的物質含量 $MS_{i,j,k,l,t}$ (ton)。SS、SRC 和 RC 分別代表鋼結構 (steel structure)、鋼骨鋼筋混凝土 (steel reinforced concrete) 和鋼筋混凝土 (reinforced concrete) 三種不同建築結構。

$$MI_{j,SS} : MI_{j,SRC} : MI_{j,RC} = \frac{MS_{i,j,SS,Lt}}{TGFA_{SS}} : \frac{MS_{i,j,SRS,Lt}}{TGFA_{SRC}} : \frac{MS_{i,j,RC,Lt}}{TGFA_{RC}} = \rho_{j,SS} : \rho_{j,SRC} : \rho_{j,RC} \text{ ----- (7)}$$

$$MS_{i,j,SS,Lt} + MS_{i,j,SRS,Lt} + MS_{i,j,RC,Lt} = MS_{i,j,t} \text{ ----- (8)}$$

由式 7 可得式 9 和式 10，

$$MS_{i,j,SRS,Lt} = \frac{\rho_{j,SRC}}{\rho_{j,SS}} \cdot \frac{MS_{i,j,SS,Lt}}{TGFA_{SS}} \cdot TGFA_{SRC} \text{ ----- (9)}$$



$$MS_{i,j,RC,l,t} = \frac{\rho_{j,RC}}{\rho_{j,SS}} \cdot \frac{MS_{i,j,SS,l,t}}{TGFA_{SS}} \cdot TGFA_{RC} \text{-----} (10)$$

將式 9 和式 10 代入式 8 可得 SS 建築之物質存量($MS_{i,j,SS,l,t}$)，如式 11 所示。依據相同的程序將式 8 之 $MS_{i,j,SRS,l,t}$ 和 $MS_{i,j,RC,l,t}$ 由式 7 代換可得 SRC 和 RC 建築之物質存量，因此推導得分配因子 $AL_{j,k,l,t}$ 如式 5 所示。式 5 之 n 和 m 分別為種類 k 的個數和單一量體 l 的個數。

$$MS_{i,j,SS,l,t} = MS_{i,j,t} \times \frac{\rho_{j,SS} \times TGFA_{SS}}{\rho_{j,SS} \times TGFA_{SS} + \rho_{j,SRC} \times TGFA_{SRC} + \rho_{j,RC} \times TGFA_{RC}} \text{-----} (11)$$

部分產品異質性較小或是物質用量不受產品種類影響，則直接依據量體特性分配，即分配因子中之 $\rho_{j,k}$ 值即為 n 的倒數。例如產品異質性較小的汽車，即可依據車輛排氣量分配。建築中鋁的用量受結構影響較小，亦可直接依據總樓地板面積分配物質存量。本研究使用之 $\rho_{j,k}$ (表 3-1)為由物質強度(表 3-2)計算而得。

表 3-1 臺灣建築目標物質比例($\rho_{j,k}$)

建築結構	混凝土	鋼鐵	磚	木材
RC	34%	19%	10%	3%
SRC	33%	37%	-	3%
SS	12%	31%	7%	3%
磚造	9%	2%	50%	23%
木造	-	-	7%	70%
其它	13%	11%	26%	-

SS：鋼結構；SRC：鋼骨鋼筋混凝土；RC：鋼筋混凝土



2. 存量比例(stock ration)

存量比例(stock ratio, SR)為混合型物質流分析的關鍵參數。傳統 TD 之瓶頸為無法得知當年度有多少的物質流入量(material inflow)轉變為物質存量。本研究應用 IOTs 固定資本形成和總供給資料計算SR，瞭解當年度有多少比例的物質流入量轉變為物質存量(如式 3 所示)。將SR乘上物質總量即可估算目標區域內之總物質存量。Hashimoto et al. (2007)也應用過相似的程序計算物質存量，但該研究視建材代謝為穩態(steady-state)，設定SR為 100%。SR代表性受 IOTs 部門分類影響，有關SR的限制可參照 4.3 混合型物質流分析限制章節。根據式 3 計算 2001, 2004, 2006 和 2011 年建築之SR分別為 85%, 86%, 84%和 82%。

3.2 由上而下方法(top-down approach)

Top-down 方法為依循世界資源研究所(World Resources Institute, WRI)物質流系統(圖 1-1)淨存貨增加量之計算方程式，如式 12 所示(Matthews et al. 2000)。淨存貨增加量NAS (ton)為直接物質輸入DMI(ton)減去國內製程輸出DPO(ton)和出口EXP(ton)。DMI和 HMFA 方法之參數相同，為由政府總體統計資料或產業統計年報取得。DPO為廢棄物與排放物產出量，通常為政府環保部門統計。IMP則亦可於政府總體統計資料或海關進出口統計取得。Top-down 方法為大尺度評估結果，且無法細分物質類別。然而在本建築案例當中，建築新增樓地板面積遠大於拆除樓地面積(附件一)，意即建築 GAS 遠大於 EWS。NAS 可由式 12 計算得到，亦可由 GAS 減去 EWS 得到。因此本研究假設建築 NAS 約等於 GAS，以探討應用三種物質存量評估方法分析結果之差異。

$$NAS = DMI - DPO - EXP \text{ ----- (12)}$$



3.3 由下而上方法(bottom-up approach)

在微尺度數據完備的情形下，本研究將區域內所有建築物總樓地板面積(m²)乘以單位樓地板面積物質含量(kg/m²)得總建材存量(kg)，方程式如下所示(Tanikawa and Hashimoto 2009; Tanikawa et al. 2015; Kleemann et al. 2017a)。MS為建築物質存量(kg)；TGFA_{i,j,t}為建築結構i用途j在t年的總樓地板面積(m²)；MI_{m,i,j}為建築結構i用途j單位樓地板面積物質m的物質強度(kg/m²)。k, l, n, o分別為m, i, j, t之總數。

計算出都市中的MS後，再結合GIS資料即可得到高解析的MS空間分布，物質存量空間化步驟於下節詳述。

$$MS = \sum_{m,i,j,t}^{k,l,n,o} (TGFA_{i,j,t} \times MI_{m,i,j}) \text{-----} (13)$$



3.4 物質存量空間化方法

為瞭解 MS 的空間分布，必須將 MS 的屬性資料結合至 GIS。本研究取得之建築資料為統計資料和建築面圖層資料。建築面圖層未含有任何屬性資料，因此必須將統計資料和計算後之 MS 結合至建築面圖層以瞭解 MS 空間分布，其步驟如圖 3-3 所示。首先將建築地址轉為座標，再將座標轉為點圖層。MS 和建築統計資料即成為點圖層之屬性。最後將建築點圖層和面圖層合併，即可得 MS 空間分布情形。各步驟的詳細設定說明如下。

步驟一：運用臺灣地理資訊圖資雲服務單台(TGOS)內全國門牌地址定位服務將建築地址轉為座標。座標系統為 EPSG:3825 (TWD97M121)臺灣地區適用。由於部分地址記錄不甚完整，故選擇模糊比對方式。若完全比對失敗，會進行模糊比對。模糊比對規則為先進行分單雙號機制比對，若比對失敗再進行不分單雙號機制比對。由於臺灣建築為單雙號分邊排序，故先進行單雙號機制比對可提高準確度。

步驟二：運用 GIS 軟體將步驟一的座標、MS 和統計資料轉為點圖層。本研究所使用之 GIS 軟體為 ArcGIS 10.4。單個點即代表一筆建築登記，而單點所含屬性資料包括建築原始資料(如結構、用途和年齡等)和計算過後各種建材存量資料。某些建築登記，雖然僅有一筆，但其中可能包含許多棟建築，例如學校和醫院等大型機構。由於使用執照僅有一筆，故多棟建築在地圖上僅呈現為一個點，即為使用執照登記所在地。

步驟三：運用 GIS 軟體地理位置對應功能，將位置最接近的建築點圖層屬性資料結合至面圖層屬性資料中，完成 MS 空間化。本研究所取得之面圖層資料為單一建築即為單一面圖徵。承步驟二所述，某些建築登記包含多棟建築，有數個面圖徵，但使用執照僅一筆，形成一個點圖徵，因此面圖徵數量多於點圖徵。本研究對應原則設定為所有面圖徵皆會對應至一個地理位置最接近的點圖徵。因點圖徵之座標由步驟一轉換，部分點圖徵未能和面圖徵精準重疊。為避免重覆計算，地址相



同之面圖徵僅保留一筆完整屬性數據(MS、結構、用途和年齡等)。其它地址相同之面圖徵將移除年齡以外的屬性數據，完成空間化步驟。點圖徵周圍之面圖徵可能為屬同一機構之建築，或是相近時期建設之建築。因此本研究假設點圖徵和周圍之面圖徵建築年齡相近，而保留點面圖徵對應結果之年齡數據。此空間對應過程存在不確定性，將於 6.5 臺北市累積建築物質存量不確定性和限制章節說明。

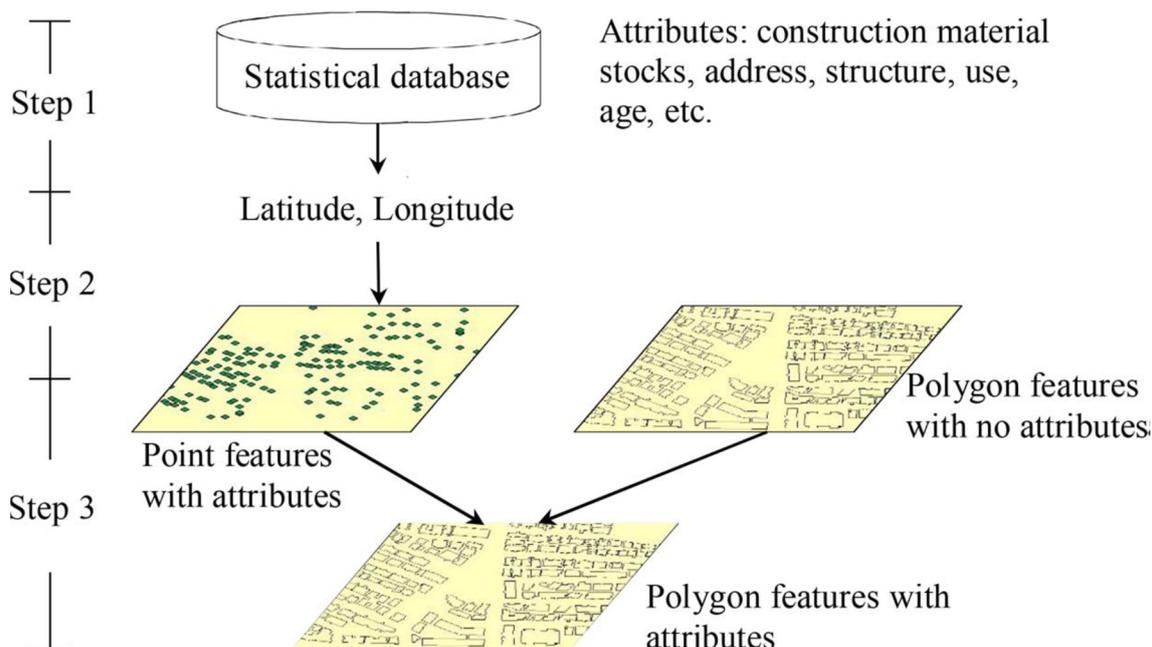


圖 3-3 物質存量空間化步驟

3.5 熱區分析

在賦予 MS 空間屬性後，為尋找區域內具較高開採潛力的老建築聚集群，本研究引用熱區分析(hot spot analysis, HSA)之 Getis-Ord's $G_i^*(d)$ 統計檢定方法，其方程式如下所示(Getis and Ord 1992)。

$$G_i^*(d) = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij}(d)x_j}{\sum_{j=1}^n x_j} \text{----- (14)}$$

Getis-Ord's $G_i^*(d)$ 為評估空間單元*i*之變數 x_i ，在距離*d*為的範圍內，與鄰接空間單元*j*之變數 x_j 的相關程度。距離*d*的決定原則為每個變數至少有一個鄰接空間單元的最短距離。 $w_{ij}(d)$ 則為距離為*d*(m)的範圍內，鄰接空間單元間的權重矩陣。在



本研究中空間單元為每個建築的面圖徵，變數 x 為建築的年齡(years)，權重設定為距離之倒數，強化距離的影響，以檢定出建築密集且年齡高的熱區。在 HSA 方法中，會將目標建築和周圍距離 d 的建築群設為鄰近區(neighborhood)，經檢定若 $G_i^*(d)$ 高則代表此鄰近區的建築年齡明顯高於整個研究範圍建築，地圖上則標記為紅色的熱區(hot spots)。若 $G_i^*(d)$ 低則代表此鄰近區的建築年齡明顯低於整個研究範圍建築，地圖上則標記為藍色的冷區(cold spots)。若分析結果無相關性則標記為黃色。而熱區聚集處即為老建築聚集群，代表具有高開採潛力之區域。

3.6 研究案例與參數說明

今日的都市存量，可為明日的都市資源(Brunner 2007)。都市礦對於現今面臨天然資源逐漸耗竭的世界而言極具意義，特別是臺灣。臺灣原生資源缺乏，長期仰賴進口，同時臺灣也是龐大的消費經濟體。2011 年產業關聯表中礦業部門進口占總供給 97% (Executive Yuan 2015)。同年 GDP 為 485,653 百萬美元，於全球 199 個經濟體中排名第 27 名(National Development Council 2017)。為滿足經濟體內部需求，許多物質由世界各地聚集到臺灣形成都市礦。若政府當局能有系統規劃都市礦山開採，並妥善利用境內都市礦，使其成為可用的二次資源，便可緩解物質進口壓力、增加物質供給安全和提升國家戰略性(Simoni et al. 2015)。因此，都市礦量化對具有高資源供給風險的臺灣而言至關重要。而臺北市為臺灣人口密度最高的都市，截止 2016 年底人口數為 2,695,704 人，土地面積(包含山坡和平原)為 271.8 km²，人口密度為 9,918 人/km² (Taipei City Government 2017)。建築需求殷切，且資料可及性高並具有可信度，故本研究選擇臺北市為個體尺度(individual-level)的研究案例。

本研究 HMFA 使用之總體統計資料包括 2001, 2004, 2006 和 2011 年的生產者價格交易表(EY 2015)。臺灣混凝土、磚、木材和鋁年生產量和年銷售量為來自工業生產統計年報(MOEA 2011)。鋼鐵用於營建工程的年銷售量為來自臺灣鋼鐵(Shih 2016)。建築統計資料包括 2001 年至 2016 年臺灣 22 個縣市的建築使用和拆除執照



(MI 2017)。執照記載建築結構、建築用途和總樓地板面積等項目。為探討臺灣各個縣市建築代謝和趨勢，本研究將此執照資料加以彙整分析，如附件一所示。臺北市 top-down 之 DPO 為營建廢棄物(TCG 2018)和營建剩餘土石方(MI 2018)合計。德國 HMFA 為採用 2010 年 IOTs (OECD 2018)，其它物質流量和存量資料為參考 Schiller et al. (2017)。

臺北市個體尺度建築資料有兩種，分別為統計資料和 GIS 圖層資料，皆為行文請臺北市建築管理工程處提供。統計資料共有 70,624 筆，項目包含建築使用執照號碼、建造起迄日期、建築結構、建築用途、總樓地板面積、地上樓層數、地下樓層數和地址等。GIS 圖層為臺北市所有建築的面圖徵，共 74,075 筆，無屬性資料。因此在空間化過程需要將 MS 和統計資料合併至面圖徵的屬性資料。

建築年齡為竣工年計算至 2014 年為止，若無竣工年記載者則由使用執照號碼前兩碼判斷，若兩者皆無即無法計算年齡。原始統計資料之結構和用途種類眾多，為便於和國際間相關研究比較，分別將建築結構歸類為鋼筋混凝土建造(reinforced concrete, RC)、鋼骨鋼筋混凝土(steel reinforced concrete, SRC)、鋼結構(steel structure, SS)、磚構造(brick)、加強磚造(reinforced brick)、石造(masonry)、木造(wood)和其它(others)。建築用途歸類為住宅、商業、工業、政府機關、公共使用、休閒文教和其它(LCE)。雖然本研究建築統計資料項目齊全，但並非每筆資料皆被完整記錄，愈久遠的資料愈易缺漏，形成無效資料。各分析階段所需資料項目和有效資料筆數將在 6.5 臺北市累積建築物質存量不確定性和限制章節探討。

建築物質強度為參考 Hsiao et al. (2002)和 Chang (2002)之研究，僅 RC 有不同用途之物質強度。Hsiao et al. (2002)和 Chang (2002)物質強度為單位樓地板面積之物質體積(m^3/m^3)或面積(m^2/m^3)，經本研究轉換為重量單位如表 3-2 所示。SRC 之物質強度為引用 Chang (2002)，然而其木材原始單位為(m^2/m^3)無相關重量轉換單



位，故 SRC 木材部分為假設與 Hsiao et al. (2002)之鋼結構相同。Chang (2002)將建
材量依樓層分類，因此本研究取各樓層建材量之平均使用。

表 3-2 臺北市建築物質強度(MI)

年分	建築結構	建築用途	(kg/m ²)						資料來源
			混凝土	鋼鐵	磚	玻璃	木材	鋁	
1994	RC	住宅	1,442	92	141	2	18	0.65	Hsiao et al. (2002)
		工廠	1,286	903	117	2.3	18	0.59	
		商辦	1,526	125	114	1.5	18	0.46	
		學校	1,601	106	206	2	18	0.65	
		其它	1,464	104	145	2	18	0.59	
2002	SRC		1,416	195	-	-	18	0.48	Chang (2002)
		SS	506	165	117	2.3	18	0.48	
1994	加強磚造	磚造	-	-	960	2	120	-	Hsiao et al. (2002)
		木造	-	-	100	2	480	-	
		其它	547	58	424	2	166	-	

SS：鋼結構；SRC：鋼骨鋼筋混凝土；RC：鋼筋混凝土



四、臺灣建築年增物質存量結果

4.1 臺灣多空間尺度建築毛存貨增加量

本研究應用 HMFA 結合工業生產統計年報、臺灣鋼鐵和 IOTs 資料評估(MOEA 2011; Shih 2016; Executive Yuan 2015)2001、2004、2006 和 2011 年臺灣 macro-level 至 individual-level 毛存貨增加量(GAS)。臺灣四個目標年度平均建材存量為 87 Mton，其中 MS 量最多的建材為混凝土，占 91%。其次為鋼鐵和磚，各占 6.6%和 2.4%。其餘建築材料木材和鋁共占 1%。四年建材 GAS 組成差異不大，各年組成差異不到 2%。臺灣歷年建材 GAS 資訊如表 4-1 所示，平均人均建材 GAS 和建材 GAS 密度皆分別為 82 ton/cap 和 382 kton/km²。

臺灣六都歷年建材 GAS 皆較其它縣市大(圖 4-1a)，六都平均加總為 61 Mton，約占臺灣建材 GAS 70%。都市採礦規劃不僅需要 GAS 總量資訊，尚需考量人均 GAS 和 GAS 密度。各縣市平均建材 GAS 最高者為桃園市 13 Mton，平均人均建材 GAS 最高者為新竹縣 8.3 ton/cap，平均建材 GAS 密度最高者為基隆市 92 kton/km²(圖 4-2b)。各縣市歷年建材組成比例和臺灣平均組成比例相近，差異低於 5%。

本研究運用 HMFA 將建材 GAS 分配至臺北市每棟建築。四年平均建材存量最高者為內湖區 1,638 kton (圖 4-3)。信義區混凝土、鋼鐵和磚建材存量分別占全區 87%、11%和 2%。除信義區外之其他行政區建材存量組成和臺灣相近。

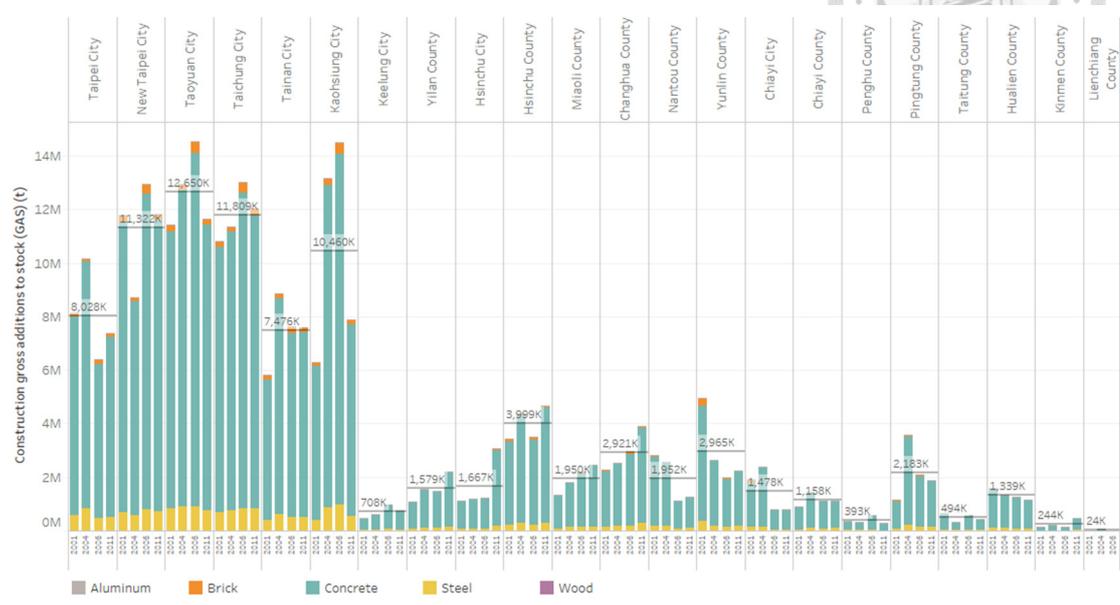
表 4-1 臺灣建築毛存貨增加量(GAS)



		2001	2004	2006	2011
Construction gross additions to stock (GAS) (ton)	Aluminum	13,901	13,269	22,960	18,261
	Brick	2,163,125	1,582,522	2,714,991	1,722,141
	Concrete	71,234,791	84,302,757	82,515,614	77,778,962
	Glass	133,473	45,884	97,530	8,839
	Steel	5,146,849	6,316,416	5,889,869	5,616,536
	Wood	39,678	35,664	33,738	8,501
	Total	78,731,817	92,296,512	91,274,702	85,153,240
Per capita construction GAS (ton/cap)	Aluminum	0.01	0.01	0.02	0.02
	Brick	2.57	1.74	2.38	1.67
	Concrete	69.83	84.80	69.31	72.54
	Glass	0.14	0.05	0.08	0.01
	Steel	5.01	6.11	4.86	5.05
	Wood	0.04	0.04	0.03	0.01
	Total	77.60	92.75	76.69	79.29
Construction GAS density (ton/km ²)	Aluminum	0.6	0.6	1.0	0.8
	Brick	94.9	66.2	116.3	77.2
	Concrete	3,128.6	3,631.8	3,574.5	3,585.7
	Glass	5.8	2.0	4.1	0.4
	Steel	222.5	271.2	246.6	235.6
	Wood	1.6	1.4	1.4	0.4
	Total	3,454.1	3,973.2	3,943.8	3,900.1



(a)



(b)

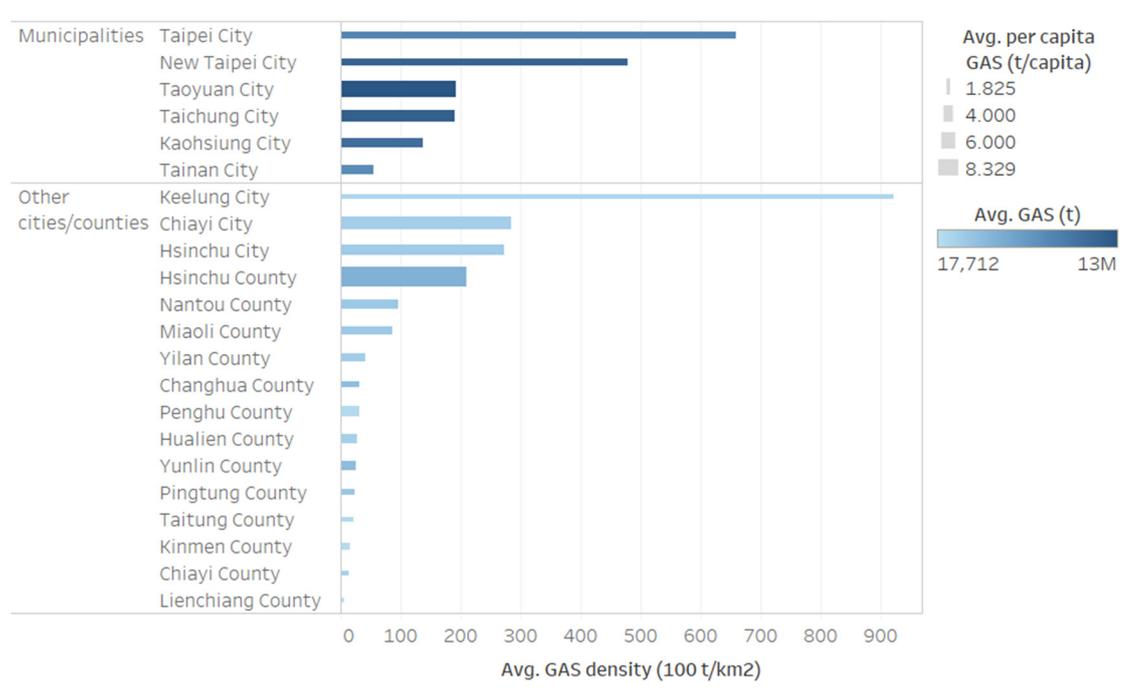


圖 4-1 臺灣縣市別四目標年度平均建材存量資訊：(a)建材 GAS；(b)建材 GAS、人均建材 GAS 和建材 GAS 密度。

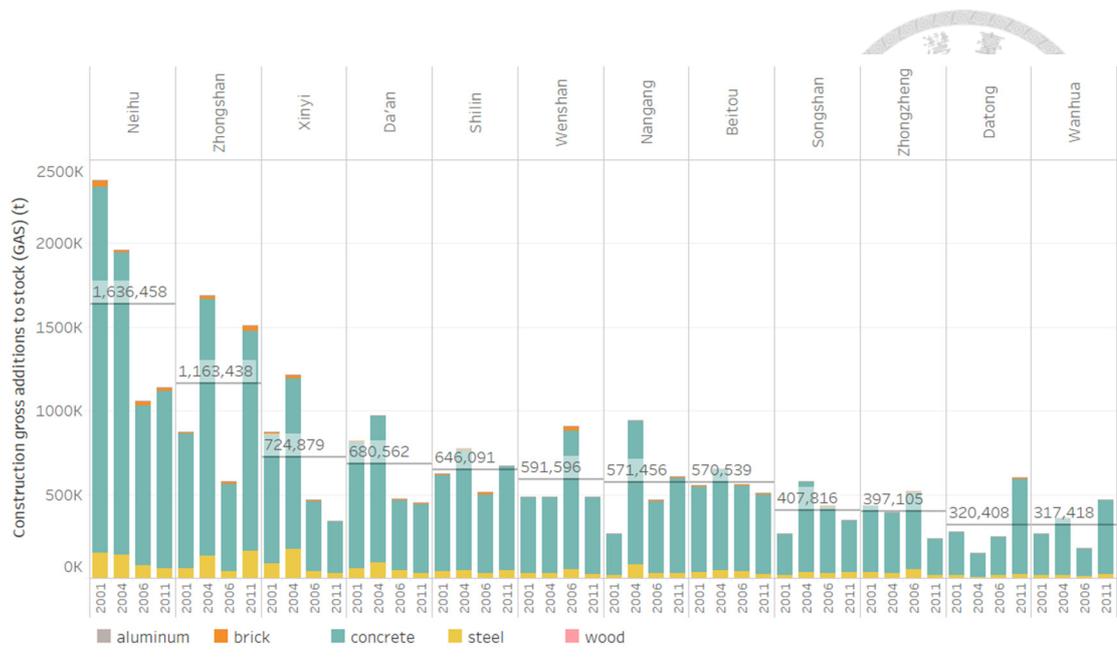


圖 4-2 臺北市行政區建築毛存貨增加量



4.2 混合型物質流分析驗證

為驗證 HMFA 的有效性，本研究比較運用 TD、HMFA 和 BU 評估臺灣、臺北市和德國 GAS 的結果。臺北市評估建材 GAS 結果為 TD 最高，HMFA 次之，BU 最低(圖 4-3)。但由物質別觀之，三方法的 GAS 趨勢略有不同。BU 的木材 GAS 高於 HMFA 結果至少 8 倍以上(圖 4-4)。甚至高於當年度臺灣製成材生產量，明顯高估。BU 的磚 GAS 高於 HMFA 結果至少 11%(圖 4-4)。各年度臺灣 BU 磚 GAS 評估結果和磚生產量皆相近，2006 年 BU 的磚 GAS 甚至高於當年度臺灣磚生產量，應和木材同屬高估。臺灣不同年度 BU 的混凝土、鋼鐵和鋁存量皆低於 HMFA(圖 4-4)。但臺北市部分年度鋼鐵和鋁存量卻高於 HMFA。

相同方法應用於德國 2010 年建材 GAS 評估得到相同趨勢，TD 最高，HMFA 居中，BU 最低(圖 4-5)。Schiller et al. (2017)無應用 BU 計算德國建築 GAS，本研究德國 BU 建築 GAS 是將 Schiller et al. (2017)建材流入量減去流出量。應用 HMFA 評估德國混凝土和鋼鐵 GAS 分別為 377 Mton 和 3.8 Mton。

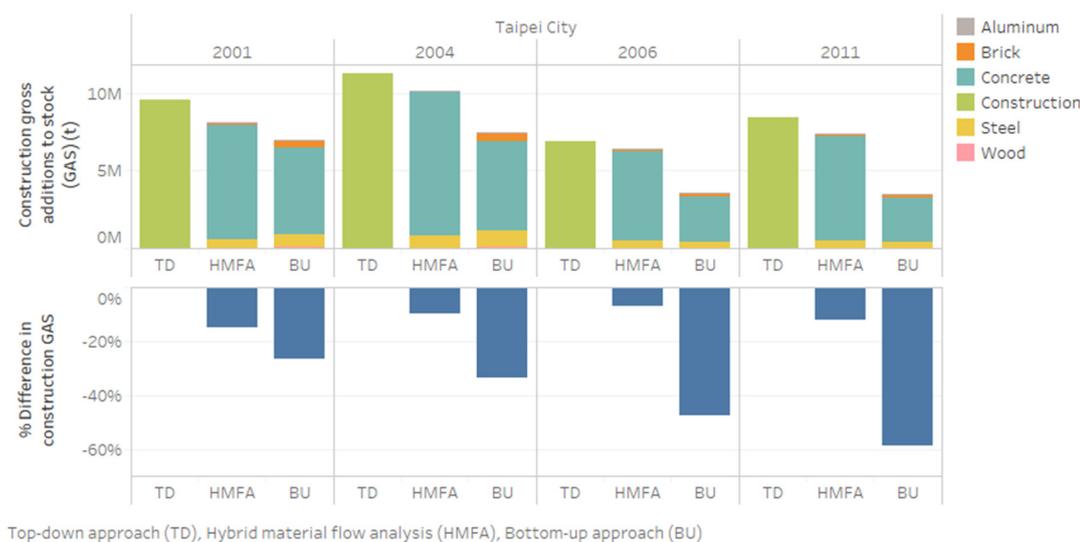
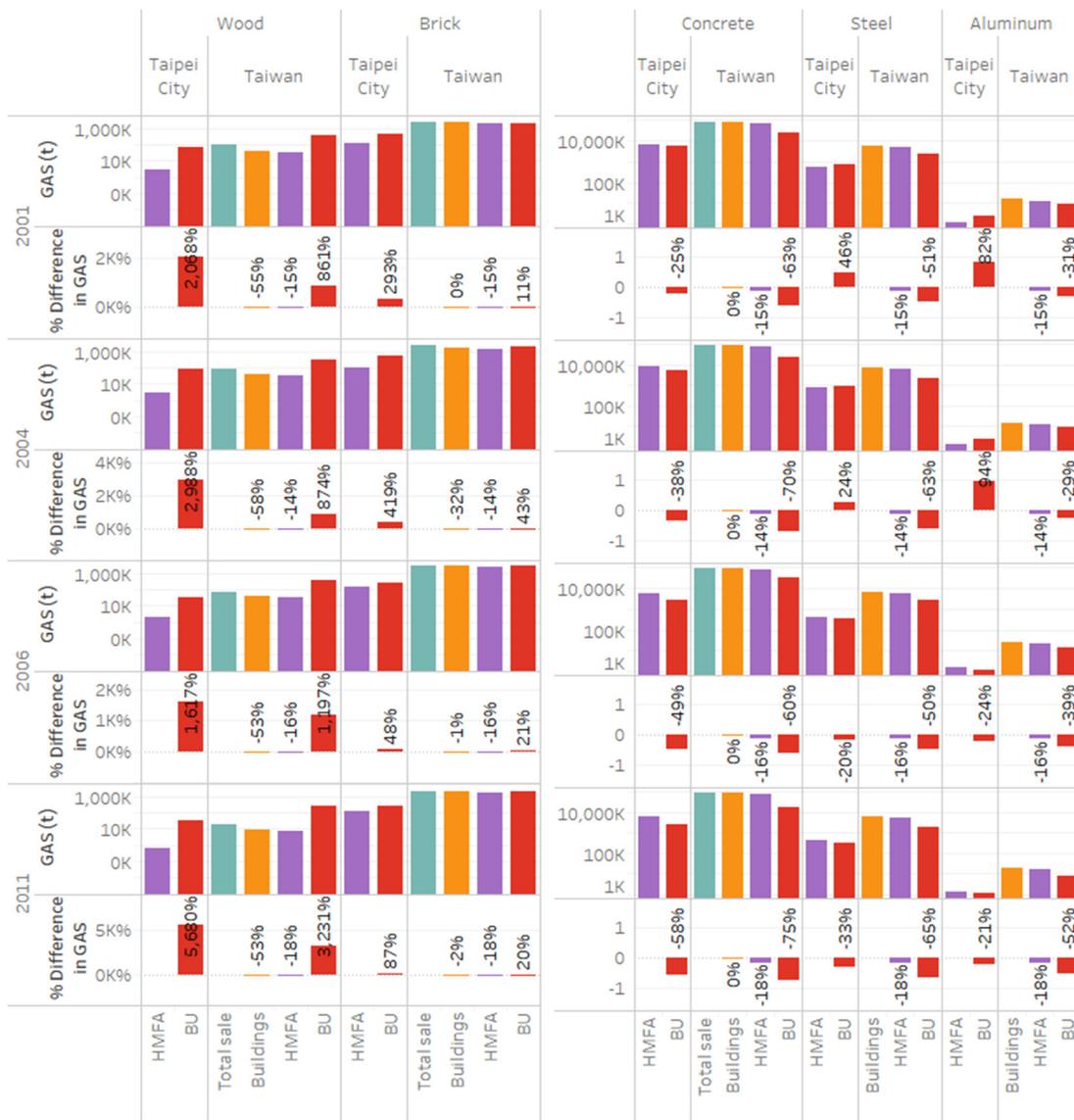


圖 4-3 臺北市 2001 年、2004 年、2006 年和 2011 年應用 TD、HMFA 和 BU 評估
建材存量結果比較



GROSS additions to stock (GAS), Top-down approach (TD), Hybrid material flow analysis (HMFA), Bottom-up approach (BU)

Total sale 為年度物質總銷售量，buildings 為應用在建築的年度物質銷售量
 圖 4-4 臺灣和臺北市 2001 年、2004 年、2006 年和 2011 年應用 HMFA 和 BU 評估建材 GAS 物質別結果與物質總銷售量之比較

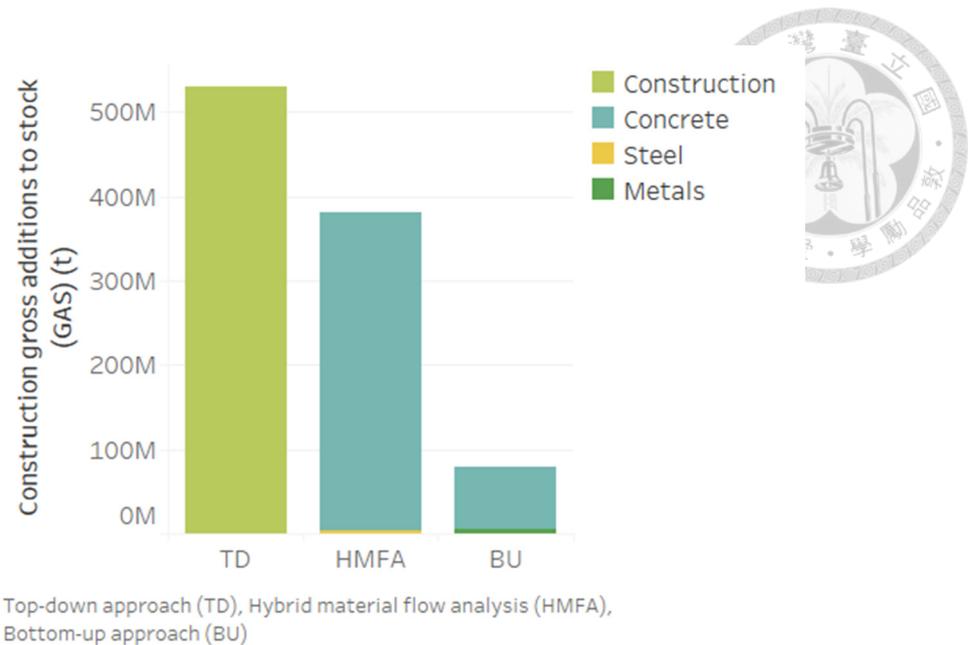


圖 4-5 德國 2010 年應用 TD、HMFA 和 BU 評估建材存量結果比較

4.3 混合型物質流分析限制

HMFA 的存量比例為來自 IOTs 資料計算，因此投入產出分析(input-output analysis)的相關限制同樣存在(Chen and Graedel, 2015)。HMFA 適用的產品部門異質性不可過高。評估結果的代表性和 IOTs 部門分類有關，當 IOTs 部門分類越細時，可以提供更細產品別的 GAS 評估。例如，IOTs 營建部門若能將營建工程和維修服務部門分開可以瞭解個別活動產生的 GAS。臺灣分類最細的 IOTs 達 500 個部門以上，此 IOTs 營建工程和維修服務部門為分開統計。使用臺灣分類最細的 IOTs 計算維修服務的 FCF 僅占營建部門 1%，因此本研究無將維修服務部門分開評估。

若 IOTs 和產品統計分類不一致將難以適用 HMFA 進行評估。囿於 IOTs 統計年度和部門分類，HMFA 無法評估久遠的年分。例如臺灣最早的 IOTs 為 1954 年所編制，僅 23 個部門。部分國家無連續普查的 IOTs 資料，可能會使存量動態分析遭遇困難。不過國際間有學者們(OECD 2018; WIOD 2018)透過各式數學迴歸方法建置有各國非普查年度之 IOTs，可供參考。



五、臺灣建築年增物質存量討論

5.1 臺灣多空間尺度建築毛存貨增加量趨勢

多年大尺度(macro-level)的 GAS 分析可以瞭解整個經濟體的變化趨勢。臺灣 2001-2011 間建材使用情形無明顯差異。人均 GAS 變化不大，僅 2004 年較 2001 年增加 20%，其餘年度人均 GAS 皆和 2001 相近。然而都市採礦至少要有 micro-level 的 GAS 資訊才可制定具效益的行動方案。本研究將臺灣各縣市四個目標年度平均建材 GAS、人均建材 GAS 和建材 GAS 密度繪於圖 4-1b。柱長代表 GAS 密度，柱顏色深淺代表 GAS 多寡，柱粗細代表人均 GAS 高低。六都中臺北市和新北市有較佳的 GAS 和 GAS 密度，但低人均 GAS 代表涉及的居民眾多。基隆市於 1998 年至 2011 年擁有臺灣最高平均人口密度³為 50,566 人/km²，基隆市 GAS 密度亦為臺灣之冠。但基隆市 GAS 和人均 GAS 較低不適合作為都市採礦熱區。新竹縣人均 GAS 最高，可能原因為常住人口數高於戶籍人口數以及空屋率較高。建議未來可分析社會經濟地理因子對於物質存量的影響，以提供更完整的詮釋。

根據本研究 micro-level 的建築代謝(附件一)和 GAS 分析瞭解各縣市建材供需傾向和建材存量詳細資訊。建議臺灣北部縣市可聯合建立建材循環圈，並以桃園市做為建材循環中心設置建材儲存銀行。匯集臺北市和新北市釋出的建材存量，供給自身縣市和新竹縣市滿足建材需求。北臺灣區域內有三個直轄市，建材存量豐富，且北臺灣所有縣市 GAS 密度皆位於臺灣十名內。桃園市建築發展目前呈現成長趨勢，平均建材 GAS 和平均人口成長率(population growth rate)皆為臺灣之最，可能為北臺灣建材需求區。1998 年至 2011 年桃園市平均人口成長率為 22%。鄰近的臺北市和新北市近年建築發展趨緩，建築拆除 TGFA 為全臺第二和第三高，推測未來將有更多建材存量釋出。桃園市 GAS 密低於六都平均，應尚可容納更多建材流入。而且桃園市 GAS 和人均 GAS 皆高，適合作為北臺灣建材循環樞紐。

³ 土地面積以平原面積計算



臺北市運用 BU 所得 50 年累積建材存量組成(6.2 臺北市建築累積物質存量)和運用 HMFA 結果不同。推測應是臺北市累積建材存量涵蓋年分較廣，早期非 RC 結構建築比例較高。根據本研究蒐集建築結構資料顯示，信義區建築 SS 和 SRC 結構比例較其它縣市高。因此鋼鐵 GAS 比例較其它縣市高。本研究運用 HMFA 評估 2001-2011 年臺灣各空間尺度 GAS 組成皆相近，推論 GAS 組成受空間尺度影響較小，受建築興造起始時間點影響較大。

5.2 混合型、由上而下和由下而上物質流分析計算毛存貨增加量差異

圖 4-3 上半部可明顯反應出 TD 和 BU 方法差異。TD 可粗估 GAS，不過無法提供詳細物質別 GAS 資訊。BU 可提供物質別 GAS 資訊，但透過文獻回顧得到的物質強度可能不完整或是低估，導致 GAS 低估。圖 4-3 下半部為將 HMFA 和 BU 的 GAS 結果和 TD 的 GAS 結果比較之差值。TD 計算方法中的建材輸入(DMI)有物質別資訊，但需減去未分類的營建廢棄物(DPO)，最終只能得到無物質別資訊的建材存量。TD 估算的 GAS 結果可視為上限，因為 TD 的 outflow 資料常難以獲得而使 MS 高估(Kleemann et al. 2017b; Wiedenhofer et al. 2019)。本研究歷年 BU 的 GAS 結果較 TD 低 27%-58%。德國 2010 年 BU 的 GAS 結果較 TD 低 53%(Schiller et al. 2017)，與本研究結果相近。

本研究運用不同方法評估臺北市建材 GAS 結果以 TD 最高，HMFA 次之，BU 最低。但臺北市不同物質應用 HMFA 和 BU 得到的建材存量趨勢略有不同。BU 高估木材和磚存量(圖 4-4)，推測可能是 RC、SS 和 SRC 結構木材和磚物質強度高估導致。因為此四目標年木造和磚構造建築比例不到 6%。由臺灣 GAS 結果判斷混凝土、鋼鐵和鋁物質強度代表性可能不足，導致 GAS 低估。BU 使用之混凝土和鋼鐵物質強度可能為低估。混凝土為最使用量最多之建築材料，Wang et al. (2016) 評估大台北地區建築水泥和砂石使用量占總消費量 63%-81%。圖 4-4 BU 結果顯示臺灣建築混凝土使用量僅占總消費量 25%-40%，故應為低估。圖 4-4 臺灣建築鋼鐵總消費量為來自鋼鐵公會年報統計數據(Shih 2016)。BU 評估臺灣建築鋼鐵 GAS



低於總消費量 50%-65%，故應為低估。但 2001 年和 2004 年 BU 評估臺北市鋼鐵 GAS 結果高於 HMFA。對照臺北市四個年度建築結構 TGFA 占比，推測可能是 SRC 結構鋼鐵物質強度高估。本研究部分建築結構無鋁物質強度，可能為導致鋁存量低估之原因(圖 4-4)。

根據三種方法得到的 GAS 結果和研究方法中使用的物質強度推論，若為物質強度會受建築結構影響且普遍存在各結構建築中之物質，應用 BU 的結果將容易低估，例如混凝土和鋼鐵。若物質強度會受建築結構影響且不普遍存在各結構建築中之物質，應用 BU 的結果將容易高估，例如木材和磚。不普遍存在各結構建築中，代表這類物質在結構中變異性較大。因此若僅由單一數值代表所有種類量體中的物質含量，易始 GAS 結果偏離。若物質強度不受建築結構影響且普遍存在各結構建築之物質，應用 BU 的結果將容易低估，例如鋁。這類物質通常使用於建築的生活機能單元例如鋁門窗。物質量相較其它結構功能物質少，資料盤查困難，易缺乏對應的物質強度。但其實建築結構對於該物質使用量影響不大，不同建築結構該物質強度應相近。這類物質在應用 BU 評估上易遭困難，適合使用 HMFA 評估。

Schiller et al. (2017)應用 TD 評估建築非金屬礦物存量大於 BU，此結果和本研究相同。建築金屬礦物存量則因資料不全(missing data)而使 TD 評估結果小於 BU。本研究應用 HMFA 評估德國 GAS，並且和應用 TD 以及 BU 結果比較得到相同趨勢，證實 HMFA 的有效性和合理性。

過去有些物質存量的研究將建材代謝視為穩態(steady state)，假設建材流入量等於建材存量(Hashimoto et al. 2009)。根據本研究存量比例顯示，單一年度大約有 82%-86%建材流入量成為建材存量。HMFA 使物質存量由平衡指標轉變為具有實際存量意義的都市礦指標。也許反而可以透過物質流入量和存量的平衡解決物質流出量低估的問題。HMFA 資料需求量和低物質強度依賴的特性，使 GAS 評估過程縮短至僅需數個月可完成。

六、臺北市累積物質存量結果與討論

本節研究重點在於使用 bottom-up 方法和熱區分析方法，探尋都市中場址尺度的熱礦場。為達此目的本研究選擇臺北市 1965 年至 2014 年之建築為評估對象，分析臺北市累積的建材存量基礎資訊和熱礦場。並將臺北市建築統計資料之建築結構、總樓層數和年齡進行關係分析。

6.1 臺北市歷年建築屬性

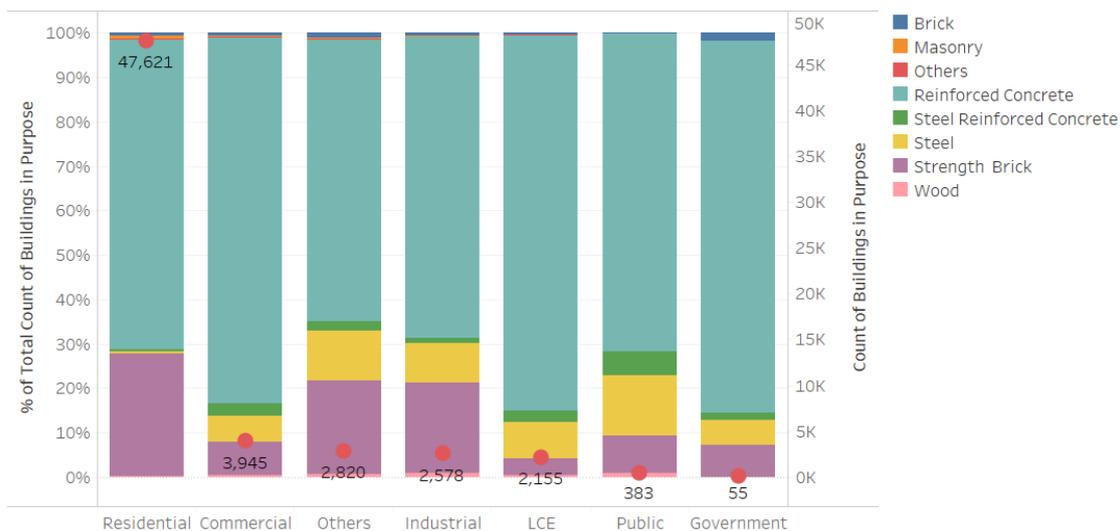
目前物質強度參照存在兩種方式，一者為使用建築用途對照，二者為使用建築結構對照(Tanikawa and Hashimoto 2009; Tanikawa et al. 2015; Marcellus-Zamora et al. 2016; Kleemann et al. 2017a; Stephan and Athanassiadis 2017)。本研究將臺北市建築用途與結構關係分析如圖 6-1。結果顯示，同種建築用途內存在 15-30%不同建築結構。若同種建築用途參照相同物質強度將增加 MS 的不確定性，因此本研究建議使用建築結構對照物質強度較佳。然而，建築結構為參照物質強度重要依據，且資料取得困難度高(Tanikawa et al. 2015; Stephan and Athanassiadis 2017)。本研究建築結構、樓層數和年齡關係分析結果可供缺乏建構結構資料之物質存量研究者參考，同時也可從中觀察臺北市建築的發展。

整體而言，50 年前臺北市建築較少高於 5 樓，多為加強磚造，僅於低於 2 樓建築有磚造或木造。41-50 年前建築多為 3-4 樓且 RC 結構比例增加至 55%。21-40 年前高於 5 樓之建築增加為前期的 13 倍，且幾乎為 RC 結構，而 3-4 層樓建築也幾乎為 RC 結構。而近 20 年，建築增加比例減少，數量最多者依然是 5-15 層樓建築，但數量已是前期的約 1/3。在建築結構部分，全樓層數 SS 和 SRC 結構比例皆增加。由同樓層數不同年齡建築觀之，早期 1 樓建築結構主要為加強磚造和木造，甚至有部分比例是石造，後期 RC 和 SS 構造比例逐漸增加，至近 20 年 RC 和 SS 構造比例各占 48%和 42%。2-4 樓建築 40 年前幾乎為加強磚造，後期以 RC 結構為主。5-15 樓建築歷年皆以 RC 結構為止。16 樓以上建築為近 40 年數量較多，且

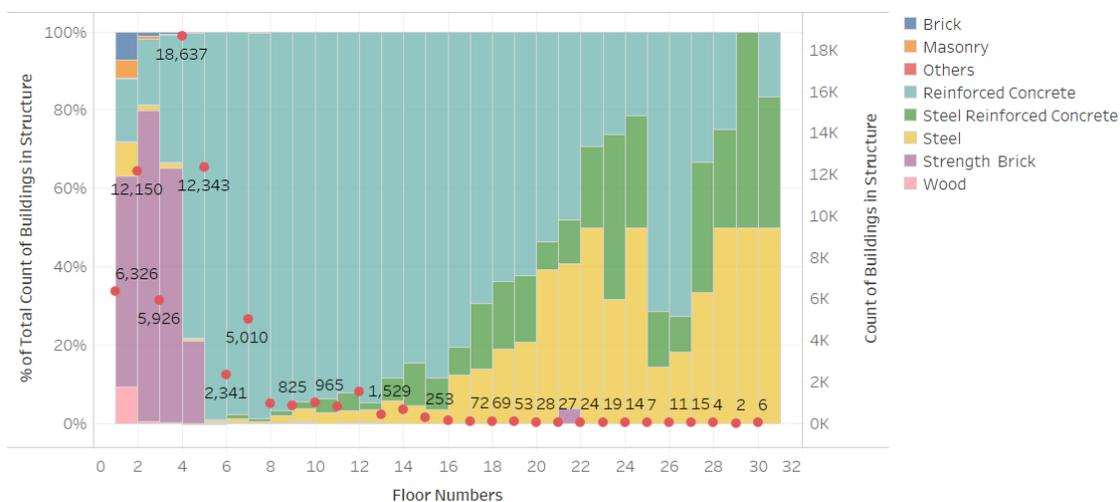


SS 和 SRC 結構比例呈增加趨勢。Taguchi et al. (2012) 也做過建築結構和樓層分析，說明兩者相關性高。根據本研究結果顯示，不同時期興造相同樓層建築所設計的結構亦不相同。在建築樓層數對照結構時，應將年齡納入參照依據。

(a)



(b)





(c)



圖 6-1 臺北市建築用途、結構、總樓層數和年齡之關係(a)用途和結構；(b)總樓層數和結構；(c)總樓層數和年齡別結構

6.2 臺北市建築累積物質存量

本階段研究運用建築總樓地板面積和物質強度評估臺北市建材存量。結果顯示自 1965 年至 2014 年已累積 183.4 Mton，為至 1990 年累積量的兩倍(圖 6-2)。其中 MS 量最多的建材為混凝土 150.1 Mton，占比 82%。其次為鋼鐵和磚分別為 15.5 和 15.3 Mton，各占 8%。其餘建築材料木頭、玻璃和鋁等共占 1%，MS 量依序為 2.2、0.2 和 0.1 Mton。臺北市人口約 2.7 百萬人，人均總建材存量為 68 ton/cap，其中人均混凝土存量為 55.7 ton/cap，人均鋼鐵存量為 5.8 ton/cap，人均磚存量為 5.7 ton/cap，而人均木材存量為 0.8 ton/cap。根據 Lee and Lee (2003)運用 EW-MFA 估算臺灣 2000 年總物質淨存貨增加量為 307 Mton，人均為 14 ton/cap。前述之總物質包含生物質、建築材料、金屬物質、非金屬物質和能源物質。Kleemann et al. (2017a) 運用 bottom-up MSA 計算 2013 年維也納人均建築物質存量為 210 ton/cap，其中人均混凝土存量為 83 ton/cap，人均磚存量為 70 ton/cap，人均鋼鐵存量為 3.2 ton/cap，而人均木材存量為 4 ton/cap。維也納人均建材存量遠高於臺北市，推測是兩地居民

生活型態不同。臺北市地小人稠，人口密度為維也納兩倍之多，每棟建築居住人口亦較多，因此人均建材存量小於維也納。就組成而言，維也納磚和木材比例也較臺北市高，顯示維也納建築可能較為低矮(4 樓以下)且建築面積大。Tanikawa and Hashimoto (2009)估算 Salford Quays 與和歌山市中心 2004 年人均建材存量分別為 111 ton/cap 和 247 ton/cap。其建材評估範疇包括鐵路、道路和建築，建築占總物質存量比例分別約為 7 成和 9 成。因此在人均建材存量方面，臺北市和 Salford Quays 相近，而維也納與和歌山市中心相近。

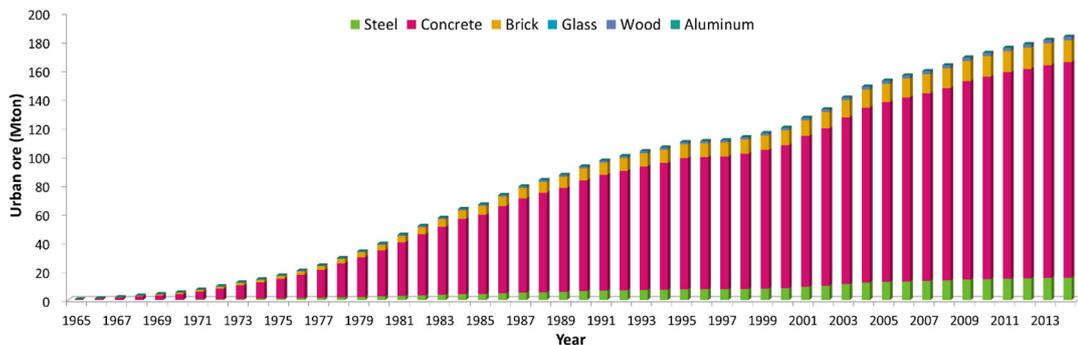
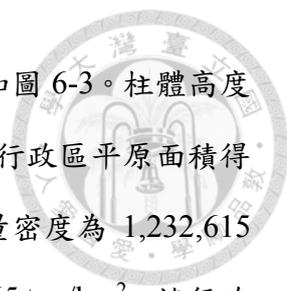


圖 6-2 臺北市建築物質存量空間分布

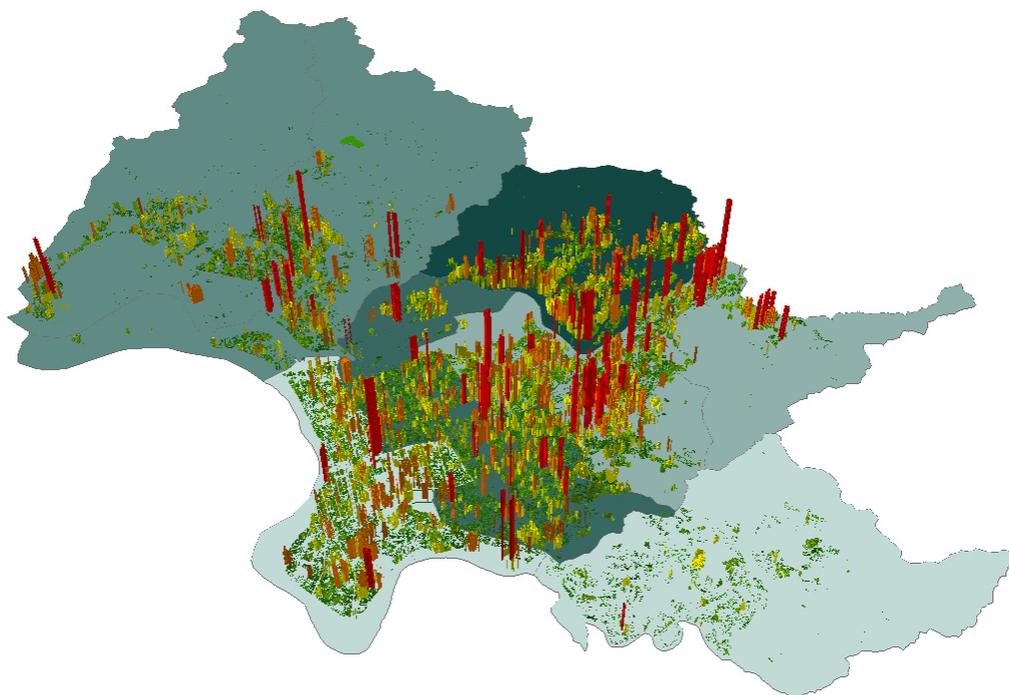
建築 MS 形成樣態為由區塊狀轉趨零碎狀(圖 6-3)。由 MS 空間分布演變也可以察見都市建築建設發展的軌跡。臺北市的建築建設是以中山區、大安區和松山區交界處為中心發展。先是東方和西北方向，再來是南方和西南方向。大約在 10 年前形成現在主要的街廓。此建築建設發展的軌跡可能成為未來都市礦釋出路徑。由統計資料分析建築年齡和數目關係如圖 6-1 所示。近 41 至 50 年前建築數目增長最快速，後期建築數目是前期的 2.7 倍。早期資料地址資料較不完整，此現象無法由地圖判釋。新增建築數目在 41 年前到達尖峰(peak)，此時期建築以低於 5 樓的加強磚造結構為主(圖 6-1)。近 20 年建築數目明顯下降，但多為高樓層建築(5 樓以上)。16 層以上建築數目最多也是在這個時期。因此累積了和 1990 年相近量的 MS(圖 6-1)。



將累積 50 年 MS 的地理位置、量和密度運用 3D-GIS 呈現如圖 6-3。柱體高度和顏色代表 MS 量。底圖顏色代表 MS 密度，是以 MS 量除以行政區平原面積得到。臺北市建材存量密度為 1,506,080 ton/km²，其中混凝土存量密度為 1,232,615 ton/km²，鋼鐵存量密度為 127,697 ton/km²，磚存量密度為 125,465 ton/km²。就行政區而言，MS 量最高且密度也最高的地區為內湖區，MS 量為 32.8 Mton，平均密度為 2,908,716 ton/km²。其次為大安區和中山區，MS 量為 26.9 和 24.7 Mton，平均密度分別為 2,655,327 和 2,132,011 ton/km²。前述密度估算所使用的面積皆為平原面積，此為考量山區建築較少占地遼闊，若將山區面積納入評估可能會影響對現象的解讀。MS 的空間分布，大多密集聚於都市中間地帶，推測可能與臺北市屬盆地地形有關，且有集約化發展的現象。Tanikawa and Hashimoto (2009)估算 Salford Quays 與和歌山市中心 2004 年建材存量密度分別為 418,000 ton/km² 和 1,121,000 ton/km²。Kleemann et al. (2017a)估算 2013 年維也納建材存量為 380 Mton，若以土地面積為 414.9 km²(不含水域面積為 395.7 km²) (Kral et al. 2014)計算，建築存量密度為 960,226 ton/km²。而臺北市 2004 年建材存量密度為 1,219,944 ton/km²，2014 年為 1,506,080 ton/km²。由此可見，臺北市施行都市採礦可能較其它地區具經濟效益。但在過程中遇到需要交涉人數可能較其它地區多，因為臺北市每單位建材所承載人數亦為三地區之冠。



(a)



(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

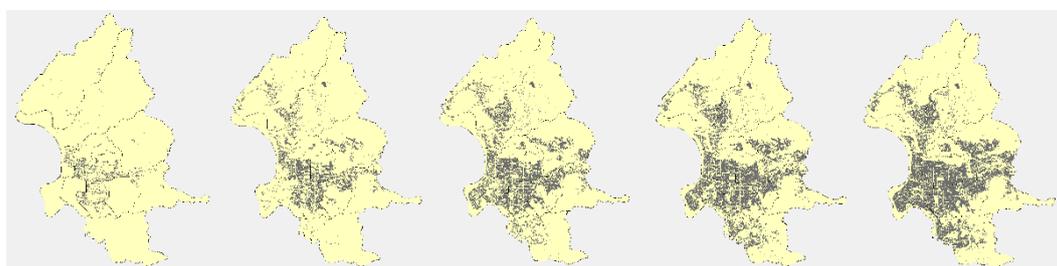


圖 6-3 臺北市建築都市礦空間分布(a) 1965-2014；(b) 1975 年；(c) 1985 年；(d) 1995 年；(e) 2005 年；(f) 2014 年



6.3 臺北市建築累積物質存量釋出趨勢

都市礦和原生礦不同之處在於都市礦必須至使用週期結束後才可開採 (Lederer et al. 2016)。都市採礦規劃必須考量都市礦可能的釋出時間，一般而言，都市礦年齡愈高釋出時間愈近。圖 6-4 為將建材礦年齡由高至低排列，分析結果顯示臺北市近 10 年(短期)建材富礦區為大安區和中山區，建材存量分別為 8.2 和 4.2 Mton，各占總建材存量 56%和 29%。長期觀之(未來 11-30 年)，富礦區依然為大安區和中山區，但中山區建材存量已高於大安區，建材存量分別為 15.4 和 13.2 Mton，各占總建材存量 17%和 14%。除原富礦區外，周圍地區如士林區和內湖區建材存量也轉趨豐富，各占總建材存量 13%和 14%。由此可見依據時間不同，富礦區也可能有所不同，故應評估同時期不同礦區的 MS 量。具備都市 MS 量、釋出趨勢以及空間分布這些資訊，規劃者可依資源需求量和時間選擇欲開發的礦區。

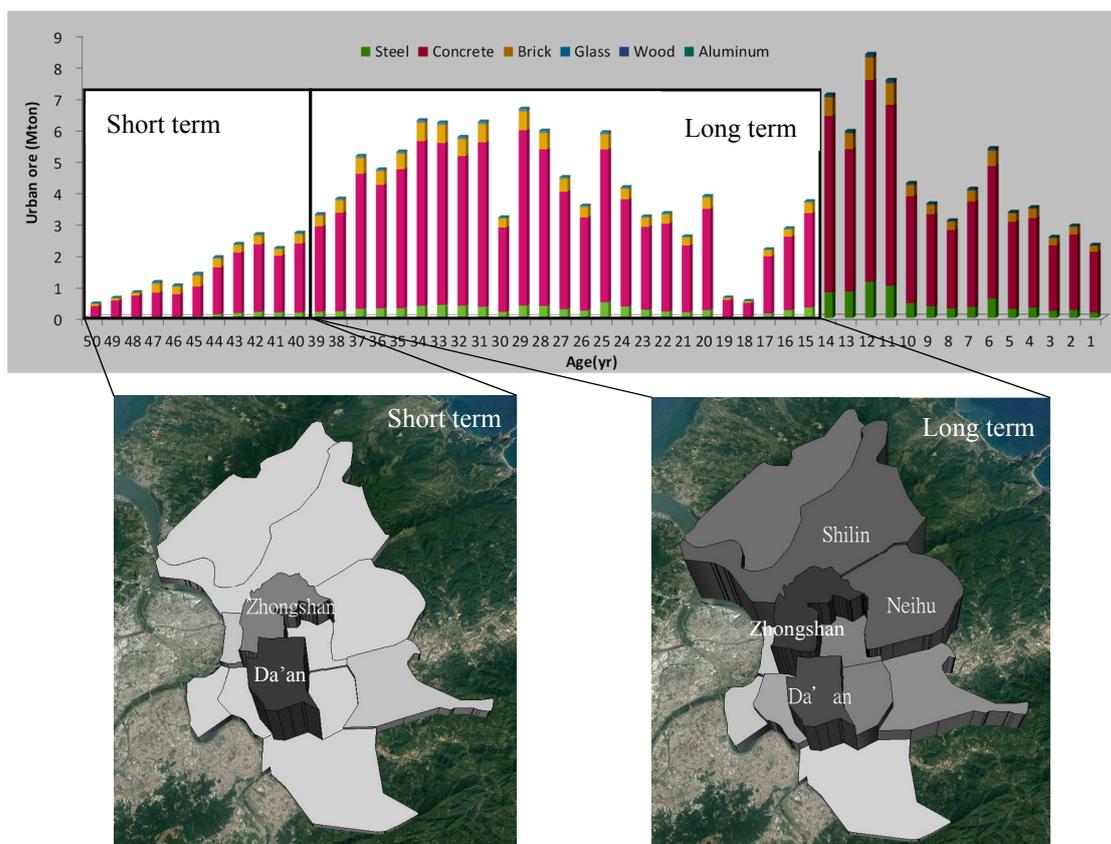


圖 6-4 臺北市建築都市礦釋出趨勢

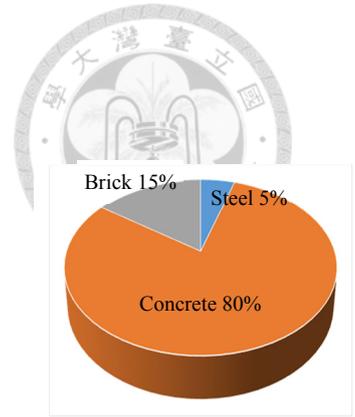


6.4 臺北市建材都市礦熱區

鑑於前節結果已知臺北市近期以大安區和中山區可能釋出的礦量較多。最後階段將以此二區為例，運用 HSA 探尋高開採潛力的老建築聚集群，分析原則著重於礦的年齡和分布。結果如圖 6-5 所示，紅色部分(hot spot)代表本身建材礦年齡較高，且周遭建材礦群年齡也較高。反之藍色部分(cold spot)代表本身建材礦年齡較低，且周遭建材礦群年齡也較低。Hot spot 聚集處則可視為熱礦場，Zone I 和 Zone II 分別為本研究探勘(exploration)之大安區和中山區熱礦場。礦場資訊如表 6-1 所示。Zone I 面積約為 0.1 km²，其中包含 185 筆建築，建築用途多為住宅，建築平均年齡為 42 年，總樓地板面積為 108,914 m²，總建材存量為 181 kton，建材礦的組成混凝土和磚各占 80%和 15%，鋼鐵占 5%。Zone II 面積約為 0.6 km²，其中包含 147 筆建築，建築用途亦多為住宅，總樓地板面積為 118,814 m²，總建材存量為 194 kton，建材礦的組成混凝土和磚各占 71%和 25%，鋼鐵占 4%。

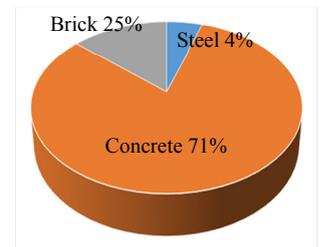
由 Zone I 和 Zone II 可觀察出在相同空間尺度下，即使年齡和 MS 量相近，組成仍可能存在差異。都市礦與原生礦相同，兩者皆為混合物，需考慮開採時會一併產出的伴隨物質(partner elements)。而伴隨物質的種類和量顯示於都市礦的組成。Zone I 和 Zone II 建築 MS 量相差 8%，但磚和鋼鐵量各相差 75%和 14%，相等於 20 kton 和 1 kton。因此開發者可依據資源種類和量的需求，選擇欲開發之熱區。除建材礦組成不同，Zone I 和 Zone II 在 MS 密度也有差異。Zone I MS 密度為 1.8 Mton/km²，約是 Zone II 的 5.6 倍，顯示開發 Zone I 應較 Zone II 更具效益。惟 Zone II 建築筆數較 Zone I 少許，可能可以減少與物主溝通的行政作業負擔，不過此屬於非工程技術面之考量。

(a)



- Cold Spot - 99% Confidence
- Cold Spot - 95% Confidence
- Cold Spot - 90% Confidence
- Not Significant
- Hot Spot - 90% Confidence
- Hot Spot - 95% Confidence
- Hot Spot - 99% Confidence

(b)



- Cold Spot - 99% Confidence
- Cold Spot - 95% Confidence
- Cold Spot - 90% Confidence
- Not Significant
- Hot Spot - 90% Confidence
- Hot Spot - 95% Confidence
- Hot Spot - 99% Confidence

圖 6-5 臺北市建築都市熱礦場 (a) 大安區 Zone I；(b) 中山區 Zone II

表 6-1 臺北市都市礦熱區資訊

District	Da'an	Zhongshan	Zone I	Zone II
Area (km ²)	11.36	13.7	0.1	0.6
Total number of buildings	1,068	438	185	147
Number of building licenses (referring to the use of buildings)	905	406	177	136
Major use of buildings	Mixed residential & residential			
Average building age (yr)	43	43	42	43
Total gross floor area (m ²)	827,976	394,477	108,914	118,814
Total amount of construction material stock(MS) (ton)	1,372,878	648,639	181,061	194,892
Steel (ton)	67,493	26,399	8,712	7,509
Concrete (ton)	1,027,577	474,719	144,655	138,877
Brick (ton)	277,808	147,521	27,695	48,506
Density of MS (Mton/km ²)	0.12	0.05	1.8	0.32

6.5 臺北市累積建築物質存量不確定性和限制

本研究為運用建築統計和 GIS 資料以及物質強度估算建材存量。建築統計和 GIS 資料為政府提供，可靠度較高。然而本研究於後述三方面仍存在不確定性。(1) 建築結構資料的不確定性；(2)無效資料導致結果的不確定性；(3)空間位置對應的不確定性。第一項不確定性為指某些建築執照所登記之結構多於一種，表示該建築非單一結構組成。由於無法得知其不同結構之樓地板面積，本研究以登記第一結構作為代表用於物質強度對應。另一種情形為某些大型機構其建築執照為一筆，其空間範圍包含多棟建築，不過其總樓地板面積為實際各棟建築加總，對於結果不確定性之影響不大。除非該機構中各建築之結構不同，本研究即延用前述原則採用登記第一結構作為代表。未來若能取得更細緻資料，例如單棟建築結構和同棟建築不同結構所應對的樓地板面積，可降低此部分不確定性。



第二項不確定性為由於建築統計資料中，部分項目數據無記錄或品質不佳，整筆資料未納入分析或計算。在都市礦量化部分由於需要參數較多，因此有效資料筆數較少，共 38,098 筆。另外有效資料最少為空間化步驟，近 4 成資料地址不完整，其中亦有部分地址無法對應至點坐標，造成最後至空間化步驟時僅餘近 5 成資料。這些無記錄或品質不佳的數據將導致都市礦總量低估。資料缺乏空間屬性，將無法探知熱礦場，降低都市採礦效益。最後一項不確定性為源自於點和面圖層空間對應過程。由於建築面圖層為高解析度，一棟建築即為一個面圖徵，因此同機構之不同建築面圖徵可能會被參照到不同建築資料點圖徵，因為地理位置較接近。此部分不確定性對於空間分析影響較大，物質存量部分仍保有完整量化資料於圖層中。

本研究物質存量評估結果為顯示都市中人類圈資源含量潛力，未來可深入評估實際可開採之資源量。本研究之建築統計資料項目已相當完整，但在記錄方面仍有些不足。某些臺北市發展很早的行政區，例如萬華區，理論上近期亦具高都市礦釋出潛勢，但由於記錄不完整，無法評估。另外由於臺灣建築材料盤查研究較少，無法分年度對應至不同時期之建築。物質強度種類亦有限，建築中尚有石材和磁磚等其它物質尚未評估。物質強度本身亦是 bottom-up 方法的限制，區域中之物質存量能否評估與評估物質種類多寡皆取決於此參數。



七、結論與建議

HMFA 為低數據依賴且合理的毛存貨增加量評估方法，可提供多空間尺度和多物質種類之 GAS，適於使用週期逾一年之耐久性產品或稱耐久財之年增物質存量評估。HMFA 結合 IOTs 資料解決 top-down 方法無法評估 GAS 的問題，以及降低微尺度 GAS 評估物質強度資料及數據品質要求之限制。在無法取得一級物質強度資料時，HMFA 可以替代 bottom-up 方法提供更準確的 GAS 結果。

HMFA 低數據依賴特性，可適用於不同國家和產品 GAS 的評估，降低跨國和跨產品 GAS 評估的難度。在這全球供應鏈時代，規劃跨國的逆物流路徑可能成為必須。此外人類圈中除了建築，尚有許多量體富含物質存量。未來可透過 HMFA 量化其它量體的都市礦潛力。

HMFA 除降低傳統 MFA 的限制之外，還可以賦予 NAS 實際存量意義。或許可以透過物質流入量和存量的平衡，解決物質流出量低估的問題。

本研究應用 HMFA、TD 和 BU 三種不同物質存量評估方法分析臺灣建築年增物質存量。HMFA 的評估結果可以提供一個比 TD 的評估結果更保守的上限，避免高估。對於部分學者採用的穩態假設，根據本研究提出之存量比例，建議可以下修 14%-18%。

由四個年度應用 HMFA 和 BU 評估臺灣和臺北市之建材 GAS，與當年度物質總銷售量比較之結果，本研究歸納出一個假說：在物質強度數據品質不佳的前提下，BU 的評估結果會受到建材使用普遍性的影響。如無法取得現地盤查的一級資料，物質強度資料分類不夠明確或缺乏特定物質強度資料等，皆會使物質強度數據品質降低。對於 MI 會受建築結構影響且普遍存在各結構建築中之物質，應用 BU 將使 GAS 低估，例如混凝土和鋼鐵。對於 MI 會受建築結構影響且不普遍存在各結構建築中之物質，應用 BU 將使 GAS 高估，例如木材和磚。對於 MI 不受建築結

構影響且普遍存在各結構建築之物質，應用 BU 將使 GAS 低估，例如鋁。HMFA 也應用在德國案例得到相同趨勢的評估結果，證實 HMFA 的有效性和合理性。

本研究對應於都市採礦程序為至探勘中期，包含都市礦的量化與空間化，尚未結合市場價格進行可行性評估。本研究應用 HMFA 得到 2001 年、2004 年、2006 年和 2011 年臺灣多尺度建材 GAS 資訊。臺灣四年平均建材 GAS 為 87 Mton。四年縣市平均建材 GAS 最高者為桃園市 13 Mton。臺北市四年平均建材 GAS 最高者為內湖區 1.6 Mton。不論空間尺度，四年平均建材 GAS 組成約為混凝土占 91%、鋼鐵占 6.6%、磚占 2.4%和其它材料共占 1%。由建築代謝和 GAS 分析顯示臺灣北部目前累積眾多建材存量尚未釋出。建議可以桃園市為建材循環中心設置建材儲存銀行，並聯合北部縣市建立北臺灣建材循環圈。因為桃園市為近期建材需求熱區，而鄰近的臺北市和新北市未來將有大量建材釋出。

另一方面，本研究運用 BU 和 HSA 發掘臺北市場址尺度的熱礦場。近 50 年來，臺北市已累積 183 Mton 建材存量，人均存量為 68 ton/cap，存量密度為 1,506,080 ton/km²。臺北市都市礦具高開採效益，因存量密度高於維也納、和歌山市中心與 Salford Quays 等其它城市。但過程中可能會遇到較繁複的權利變換和人員安置等社會問題，因其單位存量所承載的居民也較其它城市高。

都市採礦之時間因素考量將優先於量，且富礦區會隨時間改變。物質存量使用狀態也和時間相關，若量體使用週期尚未結束則無法開採。大安區和中山區為臺北市發展較早之區域，存在多於其它行政區域的老建築，為近期富礦區。透過熱區分析方法在大安和中山區找到具開發潛力的老建築聚集群 Zone I 和 Zone II。建材存量分別為 181 和 119 kton，面積分別為 0.1 和 0.6 km²。Zone I 存量密度較高，開採效益較 Zone II 高。不過兩者都市礦組成存在差異，都市礦組成亦為資源需求者重要考量之一。

本研究量化高空間解析度的都市礦資訊，有助於資源循環管理與規劃，包括資源供需分析、回收路徑和廠址選擇等。運用本研究臺北市建築結構、樓層數和年齡關係分析結果，可降低其它資料缺乏地區對於建築結構需求的限制。

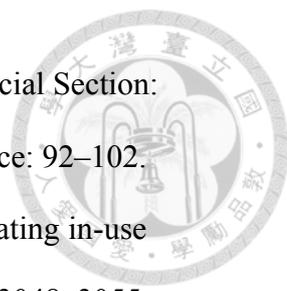
都市礦評估相當倚賴量體和物質強度資料的細緻度和完整性。建議臺灣公部門建築管理相關單位可將歷年建築建造、使用執照和拆除執照資料，整合至建築GIS面圖徵屬性資料中，提高量體資料之數據品質，且可以完整瞭解個體尺度建築代謝趨勢，益於物質供需分析。物質強度資料之數據品質提升，目前仍為一大挑戰。

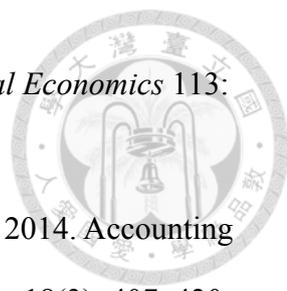
都市採礦為重塑線性營建模式的最後方式，如有其它循環路徑應優先採用，例如降低空屋率，或是從極大化產品效用的角度，評估延長建築使用壽命的可能性，亦可幫助建成環境轉型為循環經濟模式。但臺灣老舊建築眾多，例如臺北市大安區和中山區建築平均年齡為40年以上。臺灣老舊建築多已不敷使用，甚至已成為危險建築。必須盡早進行都市採礦規劃，以及盤點臺灣營建廢棄物處理量能和廢棄建材再生技術。

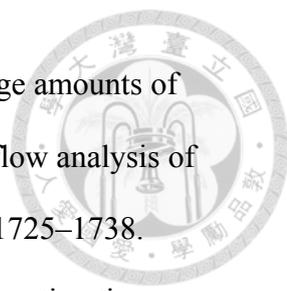
都市礦評估雖然是以量體為評估對象，但是都市礦循環規劃則是以物質為管理對象。物質存量的釋出和物質的需求存在時間延遲現象，且影響物質存量釋出和物質需求的因子並不相同，應將GAS和EWS兩者分開計算。此外物質之空間分布具有差異性。下階段研究目標可考量運用HMFA和量體生存曲線，建立多空間尺度動態物質流供需模型，再結合金錢流和能源流進行可行性評估，嘗試對於都市礦循環規劃提出建議。關於都市礦熱區之劃分，建議未來可再納入區域計畫和危險建築等內容進行疊圖分析，以獲得更實務之熱區規劃資訊。

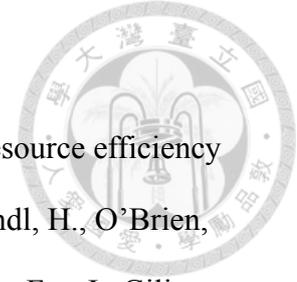
八、參考文獻

- 
- Ahmad, S.S., N. Aziz, A. Butt, R. Shabbir, and S. Erum. 2015. Spatio-temporal surveillance of water based infectious disease (malaria) in Rawalpindi, Pakistan using geostatistical modeling techniques. *Environmental Monitoring and Assessment* 187(9): 555.
- Ayres, R.U. and L. Ayres. 2002. *A handbook of industrial ecology*. Edward Elgar Publishing.
- Baccini, P. and P.H. Brunner. 1991. The Anthroposphere. In *Metabolism of the Anthroposphere*, 10–46. Springer.
- Beers, D. van and T.E. Graedel. 2007. Spatial characterisation of multi-level in-use copper and zinc stocks in Australia. *From Cleaner Production to Sustainable Production and Consumption in Australia and New Zealand: Achievements, Challenges, and Opportunities* 15(8): 849–861.
- Bocken, N.M.P., E.A. Olivetti, J.M. Cullen, J. Potting, and R. Lifset. 2017. Taking the circularity to the next level: A special issue on the circular economy. *Journal of Industrial Ecology* 21(3): 476–482.
- Brunner, P.H. 2007. Reshaping urban metabolism. *Journal of Industrial Ecology* 11(2): 11–13.
- Brunner, P.H. 2011. Urban mining. *Journal of Industrial Ecology* 15(3): 339–341.
- Brunner, P.H. and H. Rechberger. 2016. *Handbook of material flow analysis: For environmental, resource, and waste engineers*. CRC press.
- Chang, Y. S. 2002. Life cycle assessment on the reduction of carbon dioxide emission of buildings. Taiwan: National Cheng Kung University.
<http://handle.ncl.edu.tw/11296/ndltd/75149172820272925815>.
- Chen, W. Q. and T.E. Graedel. 2012. Dynamic analysis of aluminum stocks and flows in

- 
- the United States: 1900–2009. *Ecological Economics* 81. Special Section: “Planetary Boundaries” and Global Environmental Governance: 92–102.
- Chen, W. Q. and T.E. Graedel. 2015. Improved alternatives for estimating in-use material stocks. *Environmental Science & Technology* 49(5): 3048–3055.
- Cossu, R. 2013. The urban mining concept. *Special Thematic Issue: Urban Mining* 33(3): 497–498.
- Cossu, R. and I.D. Williams. 2015. Urban mining: Concepts, terminology, challenges. *Urban Mining* 45: 1–3.
- Eck, J., S. Chainey, J. Cameron, and R. Wilson. 2005. Mapping crime: understanding hotspots.
- Economic, U. and S. Council. 2017. Progress towards the sustainable development goals report of the secretary-general, United Nations.
- European Commission. 2018. On a monitoring framework for the circular economy. In *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions*.
- Executive Yuan. 2015. *The report on 2011 input-output tables*. January.
<https://www.dgbas.gov.tw/ct.asp?xItem=37004&ctNode=3106&mp=1>.
- EY. 2015. *I/O Tables*. The Directorate General of Budget, Accounting and Statistics, Executive Yuan.
- Fischer-Kowalski, M., F. Krausmann, S. Giljum, S. Lutter, A. Mayer, S. Bringezu, Y. Moriguchi, H. Schütz, H. Schandl, and H. Weisz. 2011. Methodology and indicators of economy-wide material flow accounting: State of the art and reliability across sources. *Journal of Industrial Ecology* 15(6): 855–876.
- Fishman, T., H. Schandl, and H. Tanikawa. 2015. The socio-economic drivers of

- 
- material stock accumulation in Japan's prefectures. *Ecological Economics* 113: 76–84.
- Fishman, T., H. Schandl, H. Tanikawa, P. Walker, and F. Krausmann. 2014. Accounting for the material stock of nations. *Journal of Industrial Ecology* 18(3): 407–420.
- Frosch, R.A. and N.E. Gallopoulos. 1989. Strategies for manufacturing. *Scientific American* 261(3): 144–153.
- García-Torres, S., R. Kahhat, and S. Santa-Cruz. 2017. Methodology to characterize and quantify debris generation in residential buildings after seismic events. *Resources, Conservation and Recycling* 117: 151–159.
- Getis, A. and J.K. Ord. 1992. The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical Analysis* 24(3): 189–206.
- Gontia, P., C. Nägeli, L. Rosado, Y. Kalmykova, and M. Österbring. 2018. Material-intensity database of residential buildings: A case-study of Sweden in the international context. *Resources, Conservation and Recycling* 130: 228–239.
- Graedel, T.E. 2011. The prospects for urban mining. *Bridge* 41(1): 43–50.
- Graedel, T.E., B.R. Allenby, A. Telephone, and T. Company. 1995. *Industrial ecology*. Englewood Cliffs, N.J. : Prentice Hall.
- Gupta, S., K.N. Jha, and G. Vyas. 2020. Proposing building information modeling-based theoretical framework for construction and demolition waste management: strategies and tools. *International Journal of Construction Management* 0(0): 1–11.
- Halada, K., K. Ijima, M. Shimada, and N. Katagiri. 2009. A possibility of urban mining in Japan. *Journal of the Japan Institute of Metals* 73(3): 151–160.
- Hartman, H.L. and J.M. Mutmansky. 2002. *Introductory Mining Engineering*. John Wiley & Sons, August 9.

- 
- Hashimoto, S., H. Tanikawa, and Y. Moriguchi. 2007. Where will large amounts of materials accumulated within the economy go? – A material flow analysis of construction minerals for Japan. *Waste Management* 27(12): 1725–1738.
- Hashimoto, S., H. Tanikawa, and Y. Moriguchi. 2009. Framework for estimating potential wastes and secondary resources accumulated within an economy – A case study of construction minerals in Japan. *Waste Management* 29(11): 2859–2866.
- Hattori, R., S. Horie, F. C. Hsu, C.D. Elvidge, and Y. Matsuno. 2014. Estimation of in-use steel stock for civil engineering and building using nighttime light images. *Resources, Conservation and Recycling* 83: 1–5.
- Heeren, N. 2017. Modelling environmental impacts of buildings—Energy, material, and dynamics. <http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:50660/eth-50660-02.pdf>. Accessed July 21, 2017.
- Honic, M., I. Kovacic, and H. Rechberger. 2019. Improving the recycling potential of buildings through material passports (MP): An Austrian case study. *Journal of Cleaner Production* 217: 787–797.
- Hsiao, T.Y., Y.T. Huang, Y.H. Yu, and I.K. Wernick. 2002. Modeling materials flow of waste concrete from construction and demolition wastes in Taiwan. *Resources Policy* 28(1–2): 39–47.
- Huang, T., F. Shi, H. Tanikawa, J. Fei, and J. Han. 2013. Materials demand and environmental impact of buildings construction and demolition in China based on dynamic material flow analysis. *Resources, Conservation and Recycling* 72: 91–101.
- Ibn-Mohammed, T., R. Greenough, S. Taylor, L. Ozawa-Meida, and A. Acquaye. 2013. Operational vs. embodied emissions in buildings—A review of current trends.



Energy and Buildings 66: 232–245.

IRP. 2017. Assessing Global Resource Use: A System approach to resource efficiency and pollution reduction. Bringezu, S., Ramaswami, A., Schandl, H., O'Brien, M., Pelton, R., Acquatella, J., Ayuk, E., Chiu, A., Flanegin, R., Fry, J., Giljum, S., Hashimoto, S., Hellweg, S., Hosking, K., Hu, Y., Lenzen, M., Lieber, M., Lutter, S., Miatto, A., Singh Nagpure, A., Obersteiner, M., van Oers, L., Pfister, S., Pichler, P., Russell, A., Spini, L., Tanikawa, H., van der Voet, E., Weisz, H., West, J., Wijkman, A., Zhu, B., Zivy, R. A Report of the International Resource Panel. United Nations Environment Programme. Nairobi, Kenya.

IRP, UNEP, and Production Branch. 2011. *Decoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth*. UNEP/Earthprint.

Jacobs, J. 1961. *The death and life of great American cities*. Vintage.

Johansson, N., J. Krook, M. Eklund, and B. Berglund. 2013. An integrated review of concepts and initiatives for mining the technosphere: towards a new taxonomy. *Special Volume: Urban and Landfill Mining* 55: 35–44.

Kao, J. H., T. C. Chan, F. Lai, B. C. Lin, W. Z. Sun, K. W. Chang, F. Y. Leu, and J. W. Lin. 2017. Spatial analysis and data mining techniques for identifying risk factors of out-of-hospital cardiac arrest. *International Journal of Information Management* 37(1): 1528–1538.

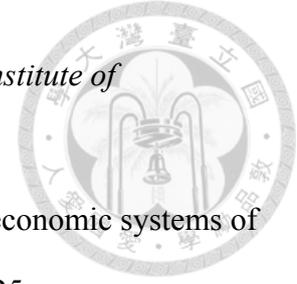
Kapur, A. and T. Graedel. 2006. Copper mines above and below the ground.

Kennedy, C., J. Cuddihy, and J. Engel-Yan. 2007. The changing metabolism of cities. *Journal of Industrial Ecology* 11(2): 43–59.

Khasreen, M.M., P.F.G. Banfill, and G.F. Menzies. 2009. Life-cycle assessment and the environmental impact of buildings: A review. *Sustainability* 1(3): 674–701.

Kleemann, F., J. Lederer, H. Rechberger, and J. Fellner. 2017a. Gis-based analysis of

- 
- Vienna's material stock in buildings. *Journal of Industrial Ecology* 21(2): 368–380.
- Kleemann, F., H. Lehner, A. Szczypińska, J. Lederer, and J. Fellner. 2017b. Using change detection data to assess amount and composition of demolition waste from buildings in Vienna. *Resources, Conservation and Recycling* 123: 37–46.
- Korhonen, J., A. Honkasalo, and J. Seppälä. 2018. Circular economy: The concept and its limitations. *Ecological Economics* 143: 37–46.
- Koutamanis, A., B. van Reijn, and E. van Bueren. 2018. Urban mining and buildings: A review of possibilities and limitations. *Resources, Conservation and Recycling* 138: 32–39.
- Kral, U., C. Y. Lin, K. Kellner, H. Ma, and P.H. Brunner. 2014. The copper balance of cities. *Journal of Industrial Ecology* 18(3): 432–444.
- Krausmann, F., D. Wiedenhofer, C. Lauk, W. Haas, H. Tanikawa, T. Fishman, A. Miatto, H. Schandl, and H. Haberl. 2017. Global socioeconomic material stocks rise 23-fold over the 20th century and require half of annual resource use. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114(8): 1880–1885.
- Lederer, J., F. Kleemann, M. Ossberger, H. Rechberger, and J. Fellner. 2016. Prospecting and exploring anthropogenic resource deposits: The case study of Vienna's subway network. *Journal of Industrial Ecology* 20(6): 1320–1333.
- Lederer, J., D. Laner, and J. Fellner. 2014. A framework for the evaluation of anthropogenic resources: The case study of phosphorus stocks in Austria. *Special Volume: The Sustainability Agenda of the Minerals and Energy Supply and Demand Network: An Integrative Analysis of Ecological, Ethical, Economic, and Technological Dimensions* 84: 368–381.
- Lee, Y. M. and Y. T. Lee. 2003. Material flow analysis in Taiwan: application



- framework and preliminary results. *Journal of the Chinese Institute of Environmental Engineering* 13(4): 263–268.
- Leontief, W.W. 1936. Quantitative input and output relations in the economic systems of the United States. *The Review of Economic Statistics*: 105–125.
- Liang, H., H. Tanikawa, Y. Matsuno, and L. Dong. 2014. Modeling in-use steel stock in China's buildings and civil engineering infrastructure using time-series of DMSP/OLS nighttime lights. *Remote Sensing* 6(6): 4780–4800.
- Marcellus-Zamora, K.A., P.M. Gallagher, S. Spatari, and H. Tanikawa. 2016. Estimating materials stocked by land-use type in historic urban buildings using spatio-temporal analytical tools. *Journal of Industrial Ecology* 20(5): 1025–1037.
- Matthews, E., C. Amann, S. Bringezu, W. Hüttler, C. Ottke, E. Rodenburg, D. Rogich, et al. 2000. *The weight of nations - material outflows from industrial economies*. World Resources Institute.
- McDonough, W. and M. Braungart. 2010. *Cradle to cradle: Remaking the way we make things*. North point press.
- MI. 2017. *The Construction and Planning Statistical Yearbook*. Construction and Planning Agency, Ministry of the Interior.
- MI. 2018. *Taiwan Residual Soil Statistics*. Construction and Planning Agency, Ministry of the Interior.
- Miatto, A., H. Schandl, and H. Tanikawa. 2017. How important are realistic building lifespan assumptions for material stock and demolition waste accounts? *Resources, Conservation and Recycling* 122: 143–154.
- Ministry of the Environment Japan. 2020. *Annual Report on the Environment, the Sound Material-Cycle Society and Biodiversity in Japan 2020*.
- MOEA. 2011. *Yearbook of Industrial Production Statistics*. Department of Statistics,



- Ministry of Economic Affairs.
- Moriguchi, Y. and S. Hashimoto. 2016. Material Flow Analysis and Waste Management. In *Taking Stock of Industrial Ecology*, ed. by Roland Clift and Angela Druckman, 247–262. Cham: Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-20571-7_12. Accessed August 8, 2020.
- Müller, D.B. 2006. Stock dynamics for forecasting material flows—Case study for housing in The Netherlands. *Ecological Economics* 59(1): 142–156.
- Myers, R.J., T. Fishman, B.K. Reck, and T.E. Graedel. 2018. Unified materials information system (UMIS): An integrated material stocks and flows data structure. *Journal of Industrial Ecology* 0(0).
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jiec.12730>. Accessed August 7, 2018.
- National Development Council. 2017. *Taiwan statistical data handbook*. June 30.
http://www.ndc.gov.tw/Content_List.aspx?n=507E4787819DDCE6.
- Nguyen, T.C., T. Fishman, A. Miatto, and H. Tanikawa. 2018. Estimating the material stock of roads: The Vietnamese case study. *Journal of Industrial Ecology*.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jiec.12773>. Accessed February 16, 2019.
- Odland, J. 1988. *Spatial autocorrelation*. Scientific geography series v. 9. Newbury Park, Calif: Sage Publications.
- OECD, ed. 2015. *Material resources, productivity and the environment*. OECD green growth studies. Paris: OECD Publishing.
- OECD. 2018. *Input-Output Tables*. Organisation for Economic Co-operation and Development. <https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=IOTS>.
- OECD. 2019. *Mining and Green Growth in the EECCA Region*. OECD Green Growth



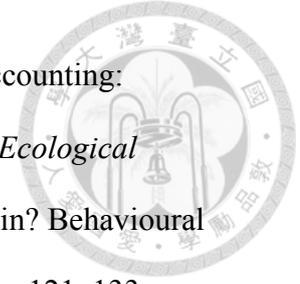
- Studies. OECD, September 25. https://www.oecd-ilibrary.org/environment/mining-and-green-growth-in-the-eecca-region_1926a45a-en. Accessed July 20, 2020.
- Pauliuk, S. and D.B. Müller. 2014. The role of in-use stocks in the social metabolism and in climate change mitigation. *Global Environmental Change* 24: 132–142.
- Pauliuk, S., T. Wang, and D.B. Müller. 2012. Moving toward the circular economy: The role of stocks in the Chinese steel cycle. *Environmental Science & Technology* 46(1): 148–154.
- Santos, R., A. Aguiar Costa, J.D. Silvestre, and L. Pyl. 2020. Development of a BIM-based environmental and economic life cycle assessment tool. *Journal of Cleaner Production* 265: 121705.
- Schiller, G., F. Müller, and R. Ortlepp. 2017. Mapping the anthropogenic stock in Germany: Metabolic evidence for a circular economy. *Resources, Conservation and Recycling* 123(Supplement C): 93–107.
- Schoer, K., R. Wood, I. Arto, and J. Weinzettel. 2013. Estimating raw material equivalents on a macro-level: Comparison of multi-regional input–output analysis and hybrid LCI-IO. *Environmental Science & Technology* 47(24): 14282–14289.
- Shih, H. W. 2016. *Taiwan's iron & steel*. Taiwan Steel & Iron Industries Association.
- Simoni, M., E.P. Kuhn, L.S. Morf, R. Kuendig, and F. Adam. 2015. Urban mining as a contribution to the resource strategy of the Canton of Zurich. *Waste Management (New York, N.Y.)* 45: 10–21.
- Stahmer, C., M. Kuhn, and N. Braun. 1996. Physical input-output tables: German experiences. In . Stockholm, Sweden, May 28.
- Stahmer, C., M. Kuhn, and N. Braun. 1997. Physische input-output-tabellen 1990. In



- Schriftenreihe Beiträge Zu Den Umwelt Ökonomischen Gesamtrechnungen*, Vol. 1: Wiesbaden, Germany: Statistisches Bundesamt.
- Stahmer, C., M. Kuhn, and N. Braun. 1998. *Physical input-output tables for Germany, 1990*. Eurostat Working Papers. Brussels: European Commission.
- Stephan, A. and A. Athanassiadis. 2017. Quantifying and mapping embodied environmental requirements of urban building stocks. *Building and Environment* 114: 187–202.
- Stephan, A. and A. Athanassiadis. 2018. Towards a more circular construction sector: Estimating and spatialising current and future non-structural material replacement flows to maintain urban building stocks. *Resources, Conservation and Recycling* 129: 248–262.
- Taguchi, G., F. C. Hsu, H. Tanikawa, and Y. Matsuno. 2012. Estimation of steel use in buildings by night time light image and GIS. *Tetsu-To-Hagane/Journal of the Iron and Steel Institute of Japan* 98(8): 450–456.
- Taipei City Government. 2017. *Taipei city statistical yearbook 2016*. April. http://w2.dbas.tapei.gov.tw/NEWS_WEEKLY/abstract/105TCSYB.pdf.
- Takahashi, K.I., R. Terakado, J. Nakamura, I. Daigo, Y. Matsuno, and Y. Adachi. 2009. In-use stock of copper analysis using satellite nighttime light observation data. *Materials Transactions* 50(7): 1871–1874.
- Tanikawa, H., T. Fishman, K. Okuoka, and K. Sugimoto. 2015. The weight of society over time and space: A comprehensive account of the construction material stock of Japan, 1945–2010. *Journal of Industrial Ecology* 19(5): 778–791.
- Tanikawa, H. and S. Hashimoto. 2009. Urban stock over time: Spatial material stock analysis using 4d-GIS. *Building Research & Information* 37(5–6): 483–502.
- Tanikawa, H., S. Managi, and C.M. Lwin. 2014. Estimates of lost material stock of



- buildings and roads due to the great east Japan earthquake and tsunami. *Journal of Industrial Ecology* 18(3): 421–431.
- TCG. 2018. *Taipei City Waste Disposal Statistics*. Department of Environmental Protection, Taipei City Government.
- Turner, G.M., R. Hoffman, B.C. McInnis, F. Poldy, and B. Foran. 2011. A tool for strategic biophysical assessment of a national economy – The Australian stocks and flows framework. *Environmental Modelling & Software* 26(9): 1134–1149.
- UNEP. 2019. UNEP circularity platform. <https://buildingcircularity.org/>. Accessed June 15, 2020.
- UNEP. 2020. *Advancing sustainable consumption & production: Circularity in the economy of tomorrow*. January 31.
- UNEP, I., M. Fischer-Kowalski, J. West, S. Giljum, M. Dittrich, N. Eisenmenger, A. Geschke, M. Lieber, H. Wieland, and A. Schaffartzik. 2016. Global material flows and resource productivity. *Assessment Report for the UNEP International Resource Panel*. United Nations Environment Programme, Nairobi.
- United Nations, D. of E. and S.A., Population division. 2019. World urbanization prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER. A/420).
- Wang, Y., P. C. Chen, H. Ma, K. L. Cheng, and C. Y. Chang. 2016. Socio-economic metabolism of urban construction materials: A case study of the Taipei metropolitan area. *Resources, Conservation and Recycling*.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344916302117>.
- Werner, T.T., L. Ciacci, G.M. Mudd, B.K. Reck, and S.A. Northey. 2018. Looking down under for a circular economy of Indium. *Environmental Science & Technology* 52(4): 2055–2062.
- Wiedenhofer, D., T. Fishman, C. Lauk, W. Haas, and F. Krausmann. 2019. Integrating



material stock dynamics into economy-wide material flow accounting: Concepts, modelling, and global application for 1900–2050. *Ecological Economics* 156. Special Section: Crowding-out or crowding-in? Behavioural and ethical responses to economic incentives for conservation: 121–133.

WIOD. 2018. *World input-output database*. <http://www.wiod.org/home>.

Yang, W. and N. Kohler. 2008. Simulation of the evolution of the Chinese building and infrastructure stock. *Building Research & Information* 36(1): 1–19.

Yokoi, R., J. Nakatani, and Y. Moriguchi. 2018. An extended model for tracking accumulation pathways of materials using input–output tables: Application to copper flows in Japan. *Sustainability* 10(3): 876.

Yu, B., S. Deng, G. Liu, C. Yang, Z. Chen, C.J. Hill, and J. Wu. 2018. Nighttime light images reveal spatial-temporal dynamics of global anthropogenic resources Accumulation above Ground. *Environmental Science & Technology* 52(20): 11520–11527.

Zabalza Bribián, I., A. Valero Capilla, and A. Aranda Usón. 2011. Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Building and Environment* 46(5): 1133–1140.

附件一、臺灣建築代謝和趨勢



附1.1 臺灣建築代謝

本研究蒐集歷年臺灣各個縣市建築執照統計資料以分析建築代謝。附圖 1-1a 顯示臺灣 6 個直轄市(後簡稱六都)歷年建築建造和拆除總樓地板面積。圖中六都由左至右之順序為依都市所在位置由北往南排列，以臺中市為界分為北臺灣和南臺灣。完整 22 個縣市歷年建築建造和拆除總樓地板面積如附圖 1-2 所示。

附圖 1-1 a.b. 中正值代表建造之總樓地板面積，負值代表拆除之總樓地板面積。六都各年拆除之 TGFA 占建造之 TGFA 極少部分。臺北市(Taipei City)16 年間平均拆除 TGFA 為 244,809 m²，平均占臺北市建造和拆除 TGFA 3.5% 為六都之最。歷年拆除 TGFA 最高者為高雄市，平均為 273,554 m²，占全市建造和拆除 TGFA 0.5%。高雄市(Kaohsiung City)平均建造 TGFA 高於臺北市 17%。

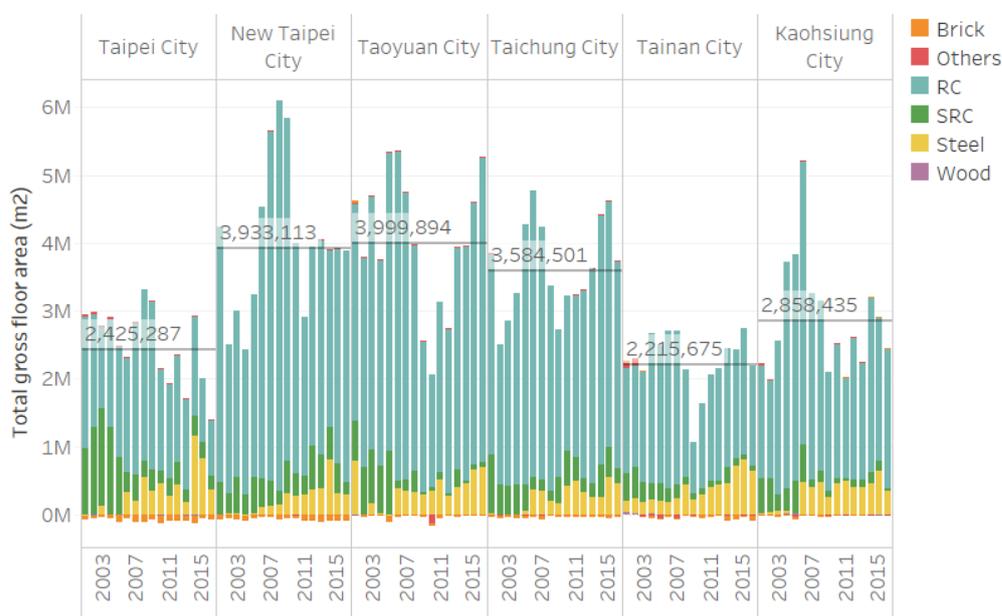
近 16 年六都建築建設發展重心位於新北市(New Taipei City)、桃園市(Taoyuan City)和臺中市(Taichung City)，臺北市、臺南市(Tainan City)和高雄市發展趨緩。2001 年至 2016 年六都共新增 42,721,528 m² TGFA 建築，用途包含住宿類(lodging)、商業類(commerce)、工業類(industry)、辦公類(business)、休閒文教類(leisure and education)、衛生福利類(health and welfare)和其它(others)。新造建築 TGFA 最多位於桃園市，歷年建造 TGFA 為 67,126,478 m²，占六都 21%。其次為新北市和臺中市，歷年建造 TGFA 分別為 66,791,629 m² 和 60,263,096 m²，各占 21%和 19%。臺北市 SS 和 SRC 結構之 TGFA 平均占 33%，高於其它五都。其它五都 RC 結構之 TGFA 平均占 73-84%。南臺灣磚構造和其它結構 TGFA 平均占 1-2%，高於其它四都。

2001 年至 2016 年六都共拆除 21,401,532 m² TGFA 建築，用途分為住宿和其它。附圖 1-1c. 建築拆除 TGFA 由北至南呈現 U 型趨勢，歷年建築拆除 TGFA 最多者為高雄市，共 4,376,865 m²，占六都的 20%。其次為臺北市和新北市，歷年拆除

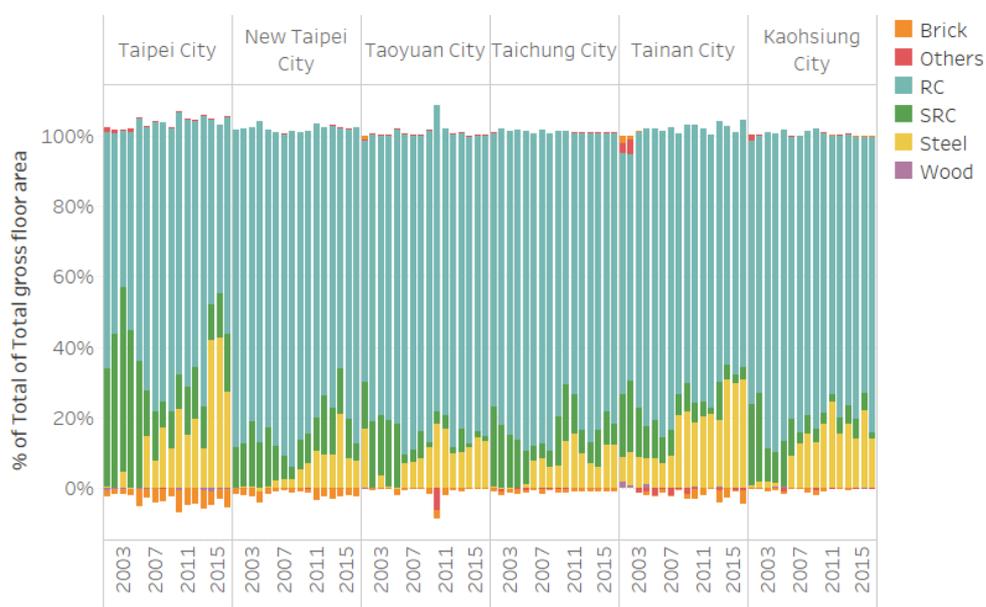


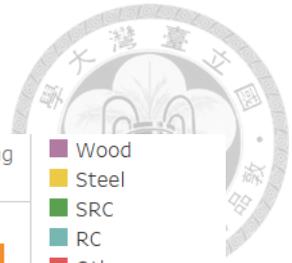
建築 TGFA 分別為 3,916,941 m² 和 3,861,825 m²，各占 18%。歷年各行政區拆除磚構造、SS、木造和其它結構建築 TGFA 比例皆高於建造建築 TGFA 比例(附圖 1-1d)。除臺北市拆除 SS 建築比例低於建造 SS 建築比例。歷年各行政區拆除 SRC 建築 TGFA 比例皆低於建造 SRC 建築 TGFA 比例。歷年拆除磚構造、RC、SRC、SS、木造和其它構造 TGFA 比例分別為 24%、53%、3%、15%、1%和 3%。臺北市歷年拆除木造建築 TGFA 比例為 4%，高於其它五都。

(a)

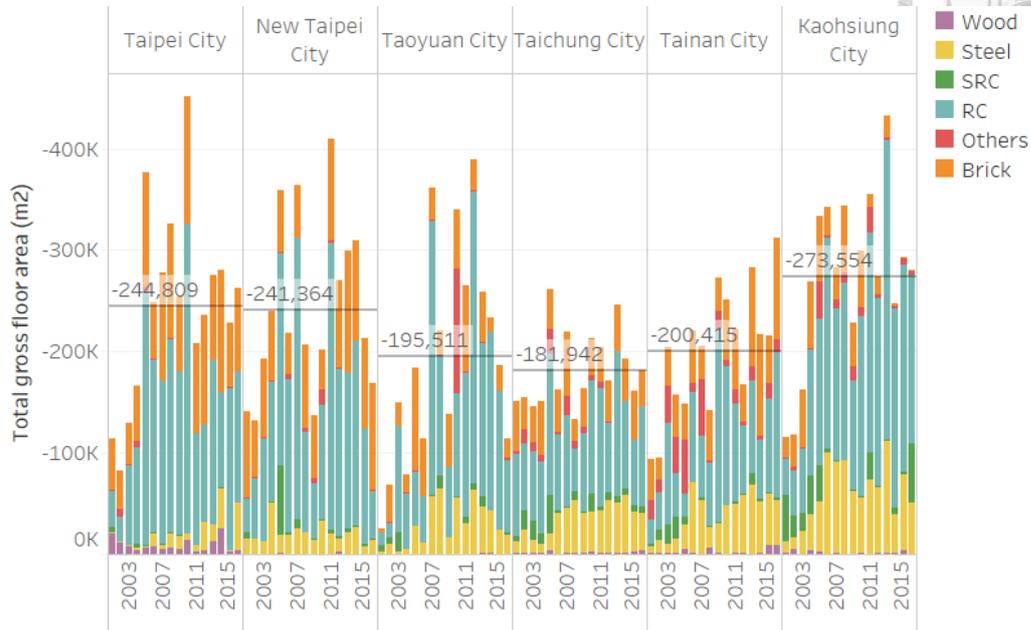


(b)

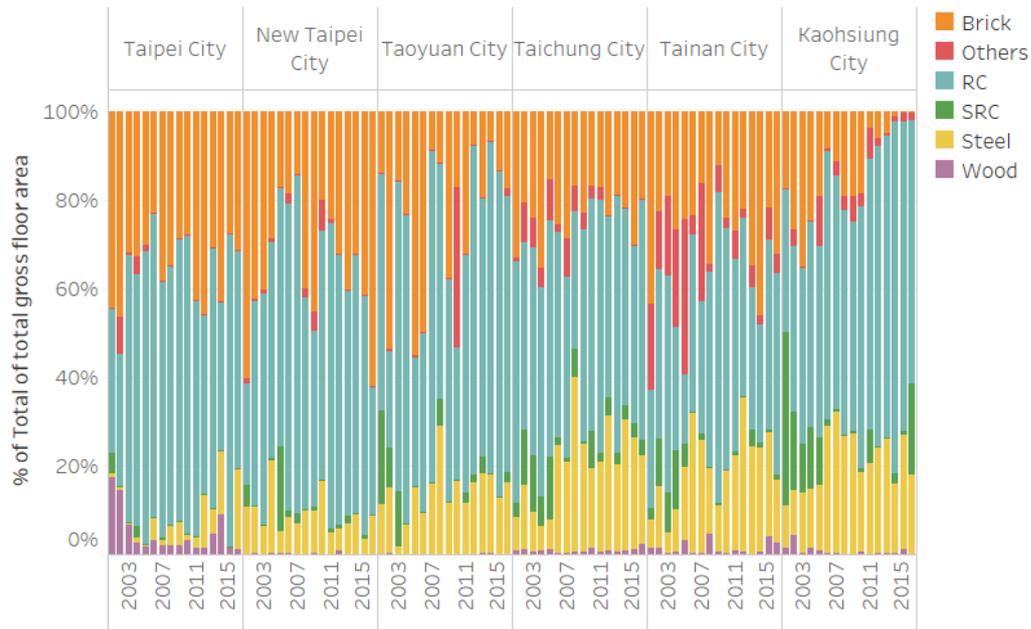




(c)



(d)



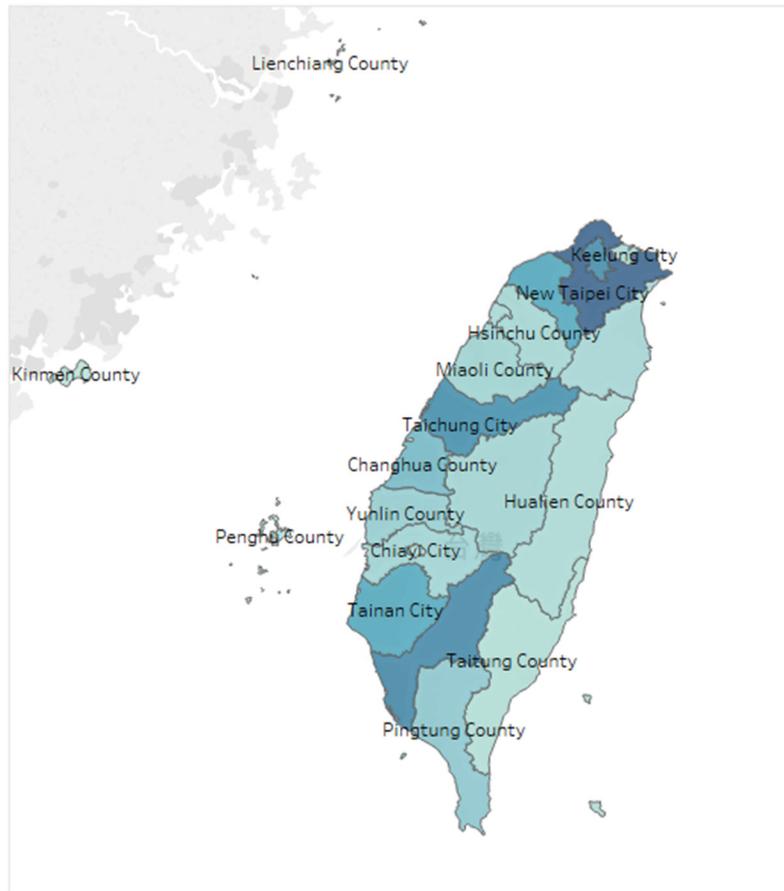
附圖 1-1 臺灣六都建築代謝：(a) 建築建造和拆除總樓地板面積；(b) 建築建造和拆除總樓地板面積百分比；(c) 建築拆除總樓地板面積；(d) 建築拆除總樓地板面積百分比



附1.2 臺灣建築代謝趨勢

經本研究建築代謝分析結果顯示，臺灣所有行政區建築建造 TGFA 皆遠大於拆除 TGFA，代表當前有大量尚未釋出的建材存量累積在都市中。此現象和國際相關研究結果相同(Tanikawa and Hashimoto 2009; Tanikawa et al. 2015; Kleemann et al. 2017a; Stephan and Athanassiadis 2018)。因此規劃建材循環經濟轉型路徑為下階段的研究目標。由六都建築建造和拆除 TGFA 分析結果顯示，建築建設發展軌跡是波動的，各都市建築建設發展也不盡相同。因此可能可以藉由時序分析結果，規劃將一都市釋出的建材存量，供給另一個都市滿足建材需求。臺北市和新北市可能由於地緣關係建築建造發展趨勢相似，在 2008 年達到建造 TGFA 的尖峰。其它四都可能因人口密度發展軌跡相仿，使建築建造發展趨勢相似，皆在 2006 年達到建造 TGFA 的尖峰。臺北市和高雄市早於 1967 年和 1979 年升格為直轄市，因此兩都近 16 年建築建造發展趨緩。即使 2010 年高雄縣市合併也未能帶來建築建造 TGFA 增長動能。

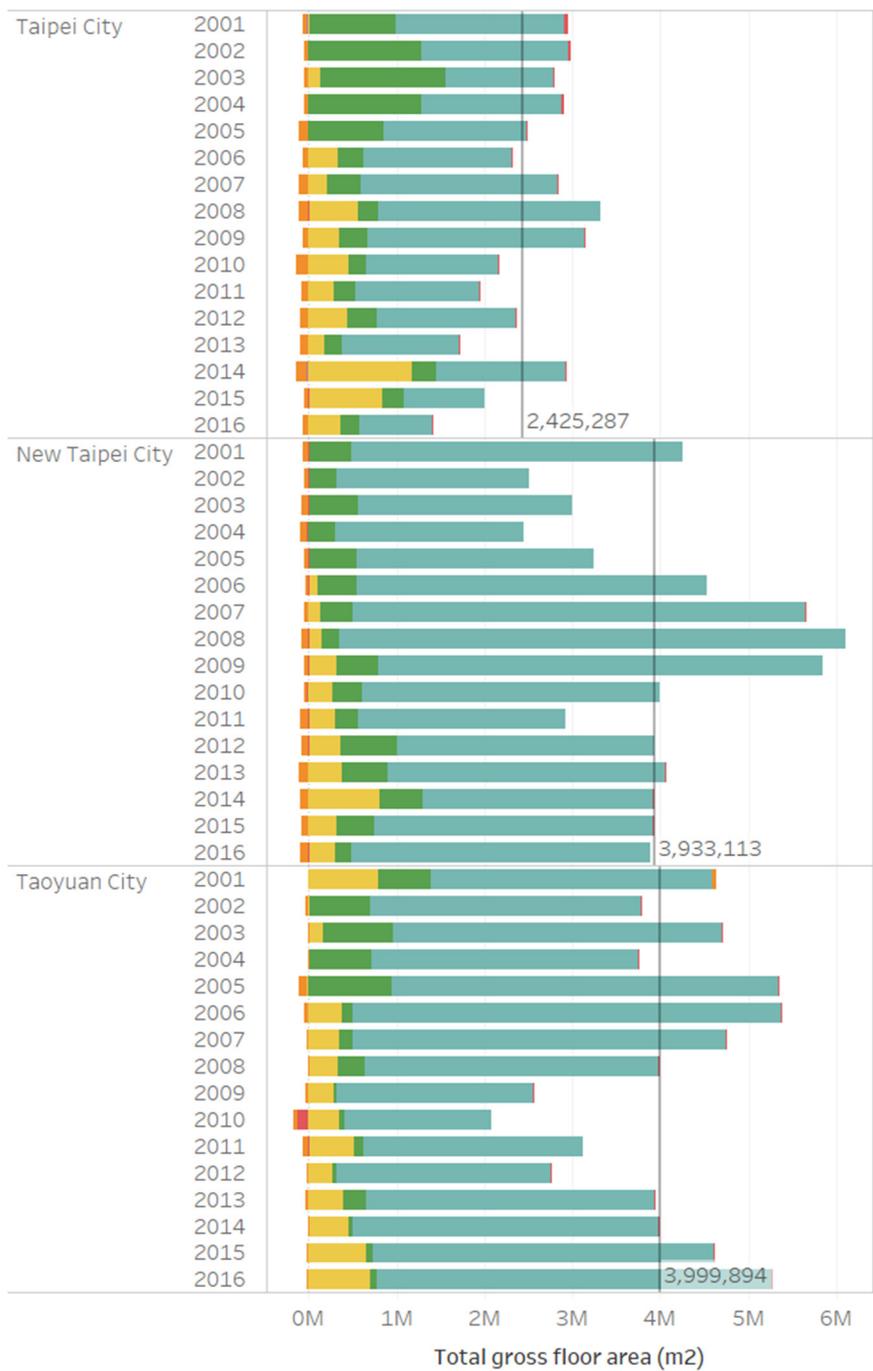
臺中市和臺南市於 2010 年升格直轄市後連續 6 年建築建造 TGFA 正增長。考量營建廠商或民眾對於直轄市升格可能產生房價上漲或社福資源增加等預期心理，臺中市和臺南市建築建造 TGFA 正增長之連續 6 年為由 2009 年起算。桃園市於 2014 年升格直轄市後建築建造 TGFA 呈正增長趨勢。由臺中市和臺南市升格經驗推斷，桃園市建築建造 TGFA 至少將持續成長 3 年。六都歷年建築拆除和建造未呈現相同趨勢，推論建材存量的釋出和需求應是受到不同社會經濟因子影響。六都歷年建築拆除結構組成中磚結構和其它結構比例明顯增加。根據臺北市建築結構、樓層數和年齡關係分析結果推測(圖 6-1)，2001 年至 2016 年釋出的建材存量可能是來自 1974 年前低於 5 樓之建築。近 20 年新造建築較常採用 SRC 結構，因此 SRC 建築拆除 TGFA 比例較建造小。



Location	Population	Flatland area (ha)
Keelung City	9,323,178	18,432
Taipei City	63,236,904	292,752
New Taipei City	90,011,382	567,126
Yilan County	11,085,432	940,476
Taoyuan City	45,242,748	1,584,108
Hsinchu City	9,450,330	146,496
Hsinchu County	11,513,274	459,726
Miaoli County	13,459,674	544,704
Taichung City	61,719,132	1,488,156
Changhua County	31,492,974	2,261,760
Nantou County	12,829,458	491,100
Yunlin County	17,534,280	2,768,250
Chiayi City	6,493,344	125,568
Chiayi County	13,278,306	1,937,646
Tainan City	44,715,126	3,289,686
Kaohsiung City	66,106,002	1,832,748
Penghu County	2,238,108	304,464
Pingtung County	21,405,816	2,296,188
Taitung County	5,695,392	533,478
Hualien County	8,306,574	1,205,724
Kinmen County	1,810,728	363,984
Lienchiang County	220,812	69,120

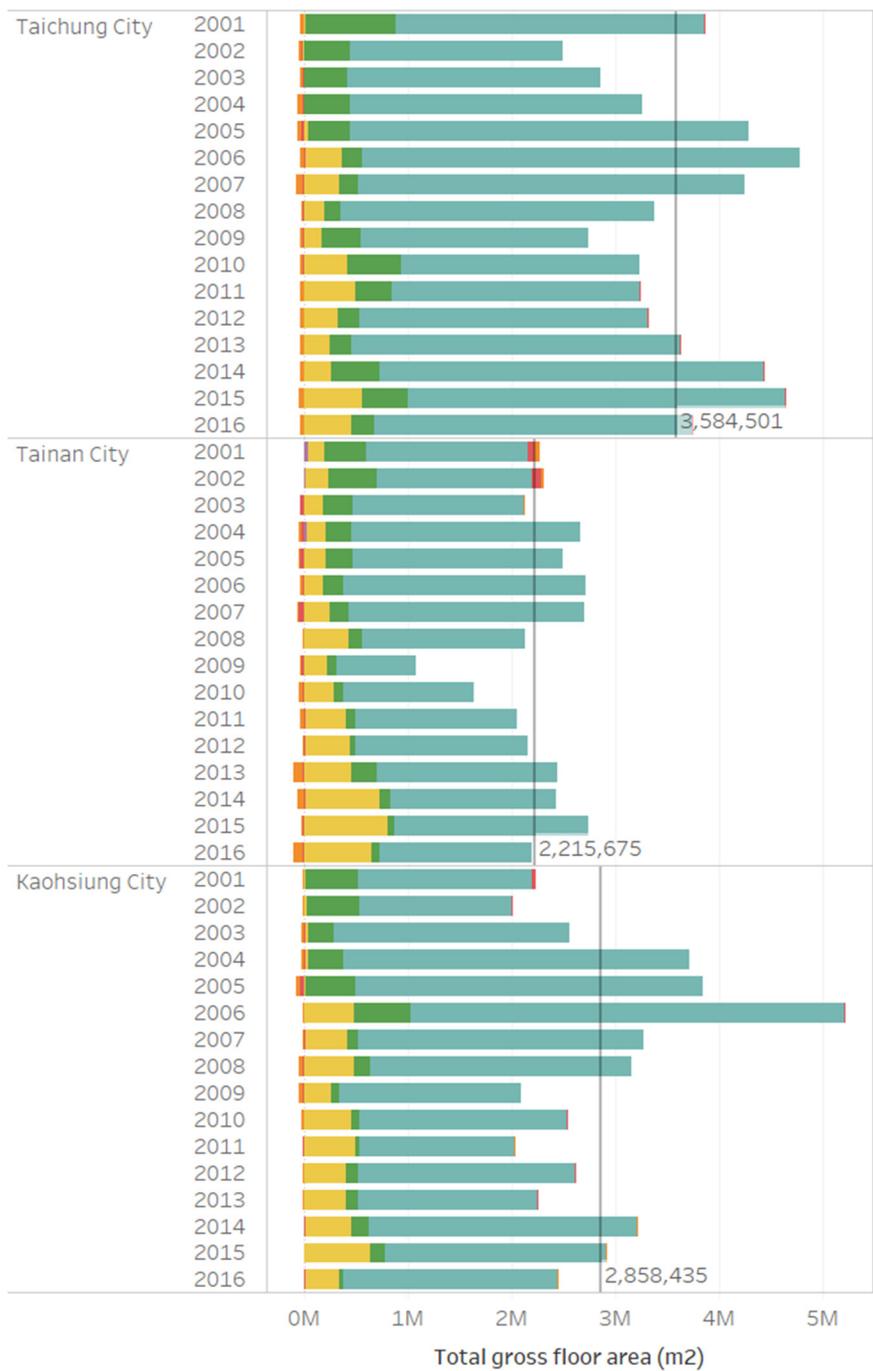


附圖 1-2 臺灣 22 個縣市位置、人口、土地面積和其它基本資訊



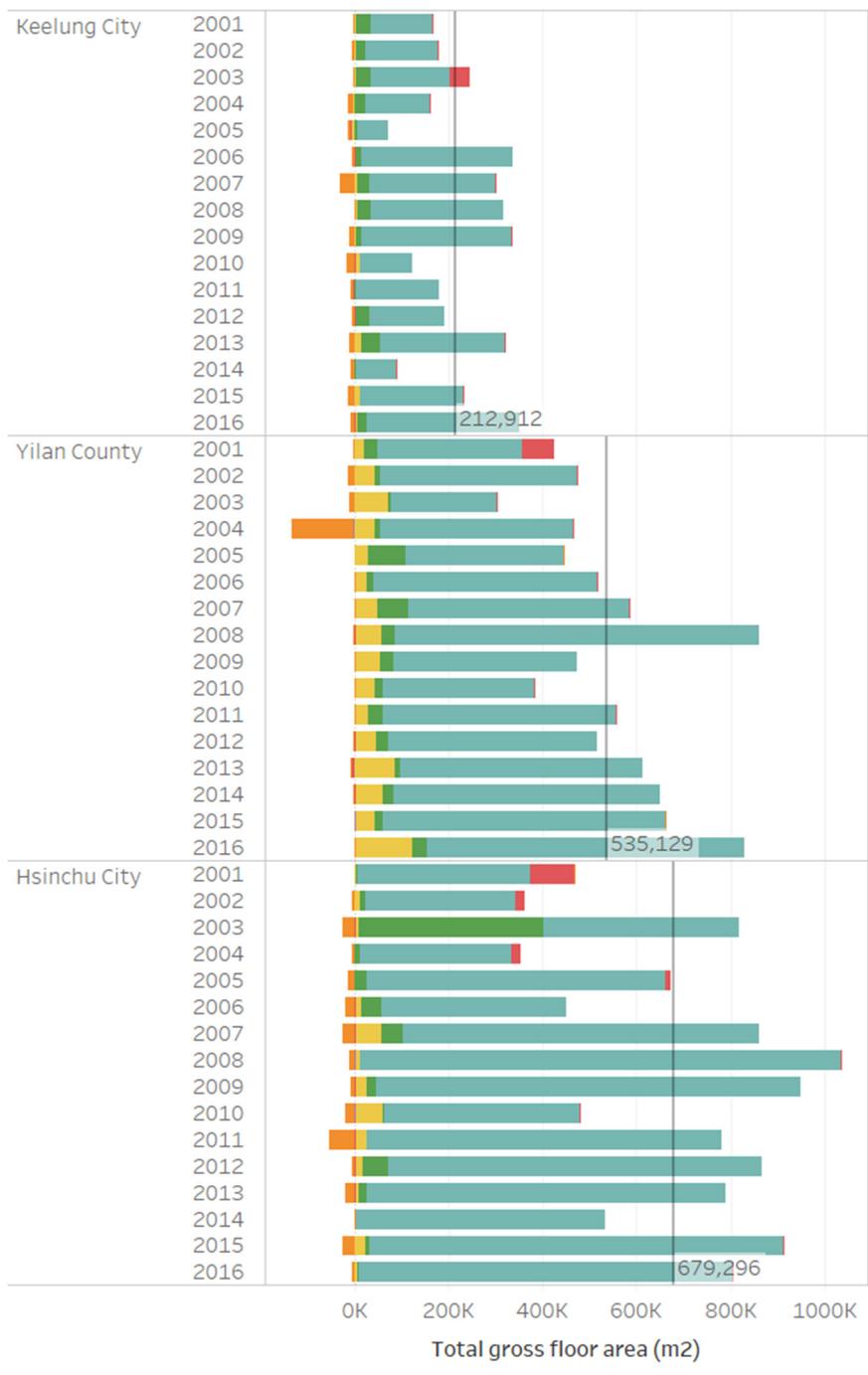
附圖 1-3 臺灣建造和拆除樓地板面積

(續下頁)



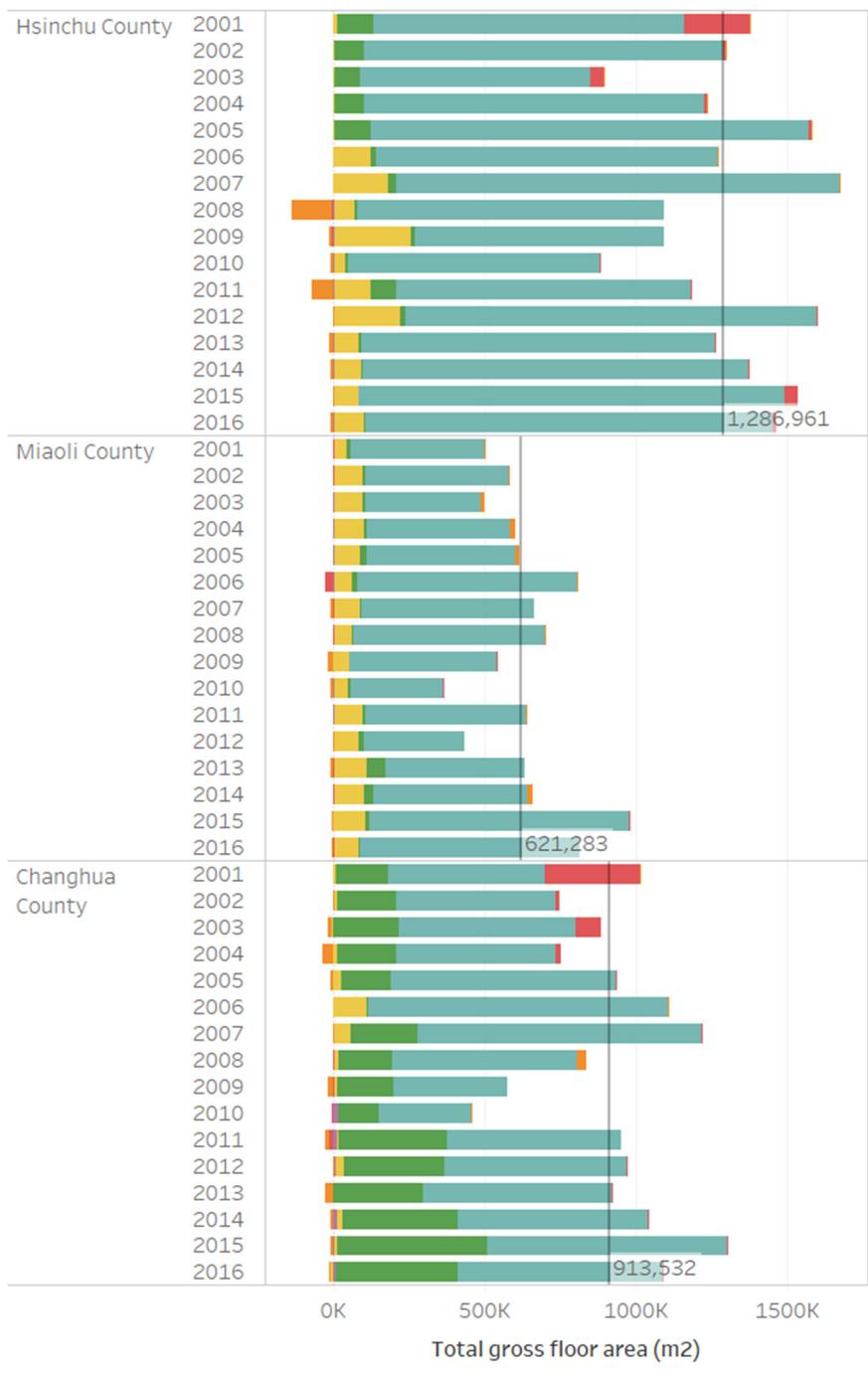
附圖 1-3 (續)

(續下頁)



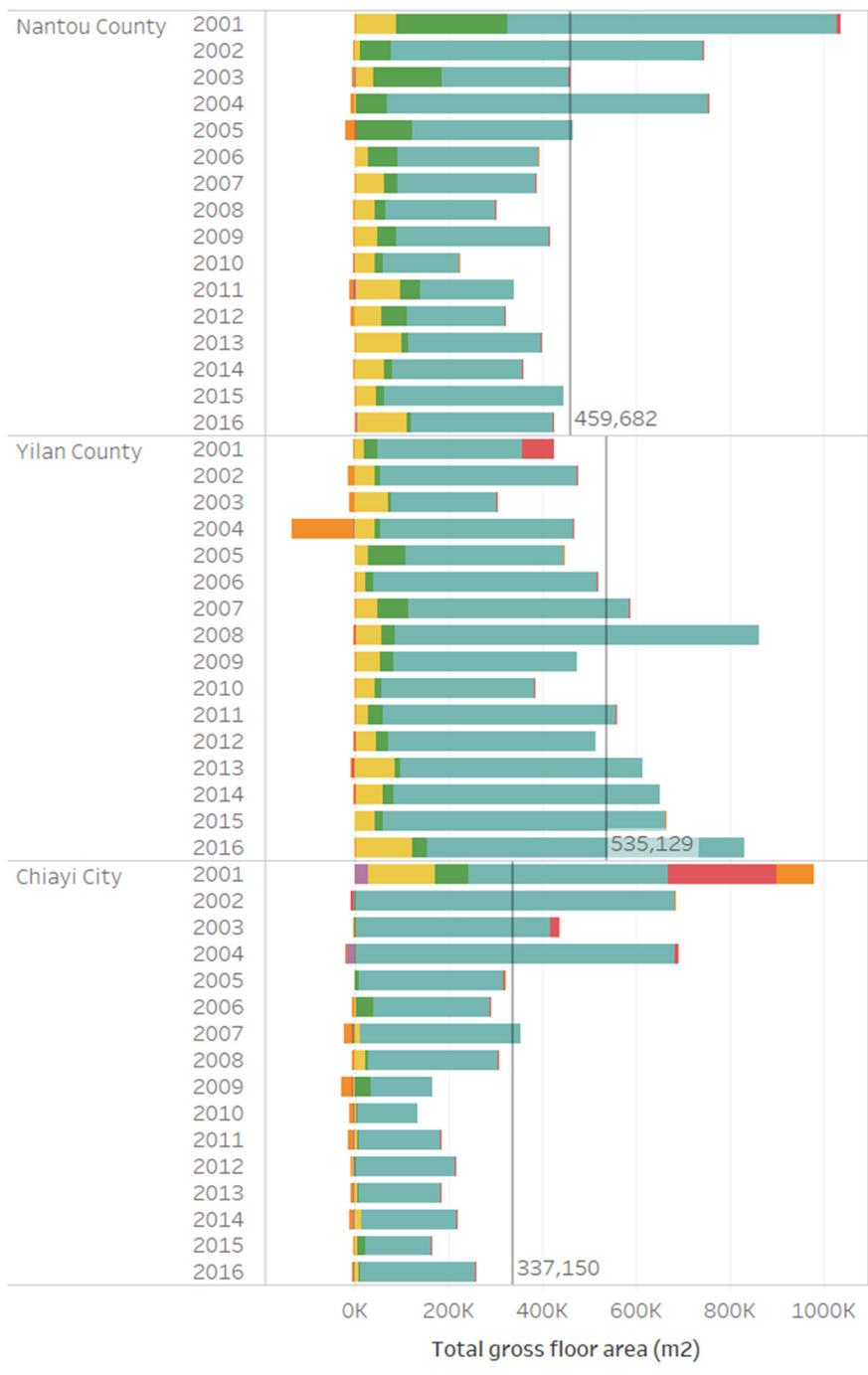
附圖 1-3 (續)

(續下頁)



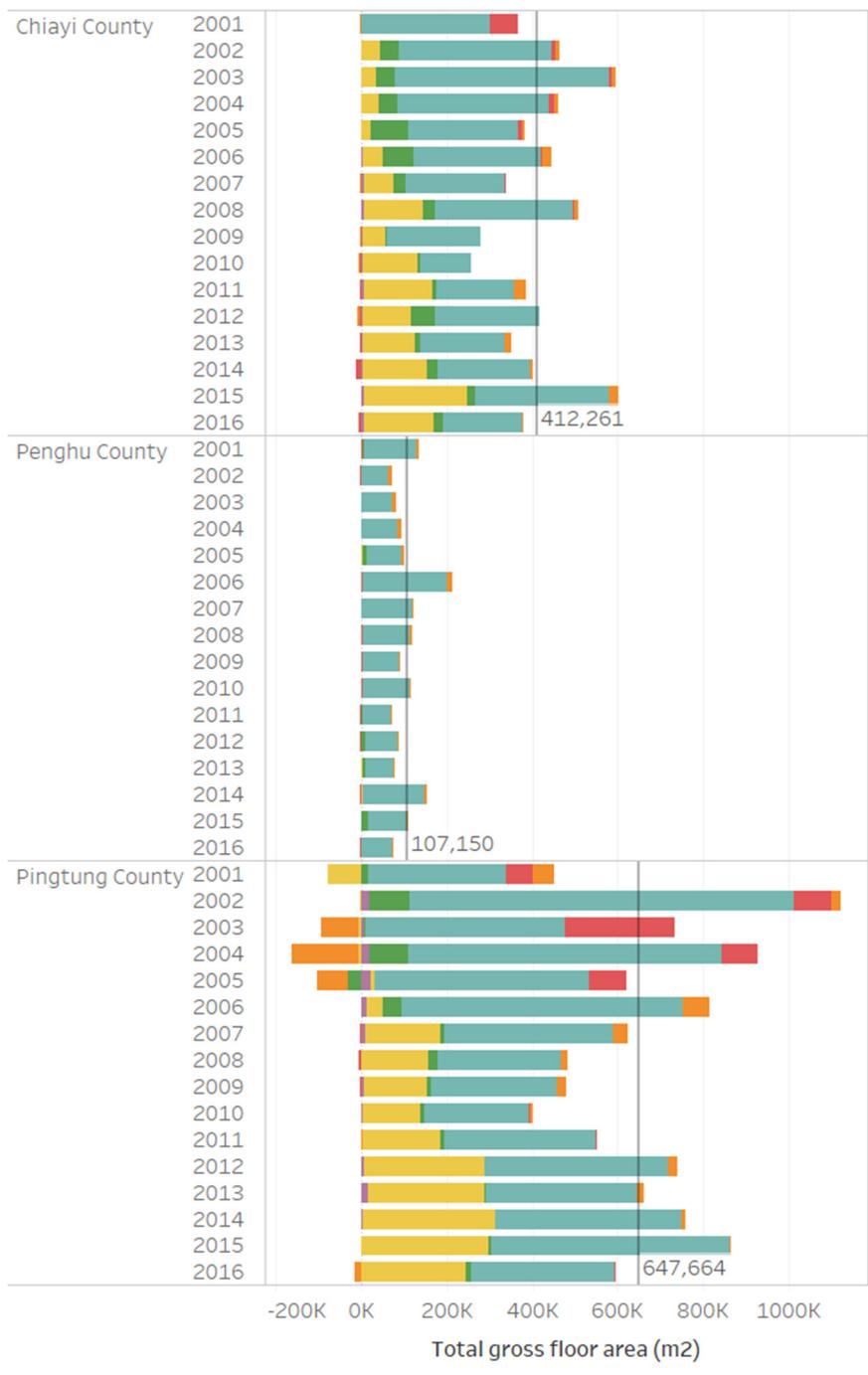
附圖 1-3 (續)

(續下頁)



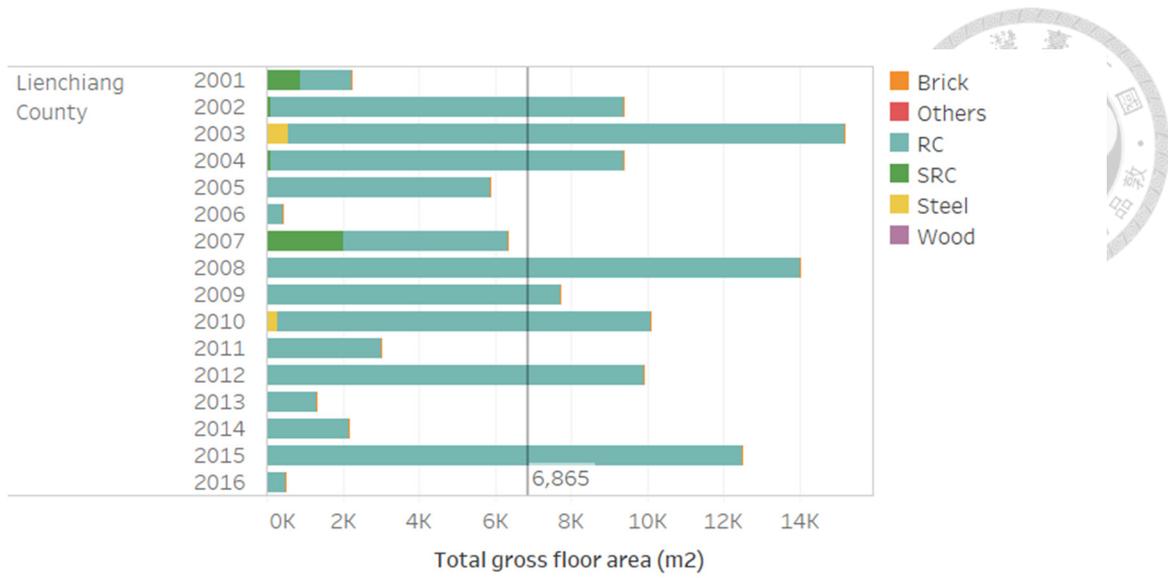
附圖 1-3 (續)

(續下頁)

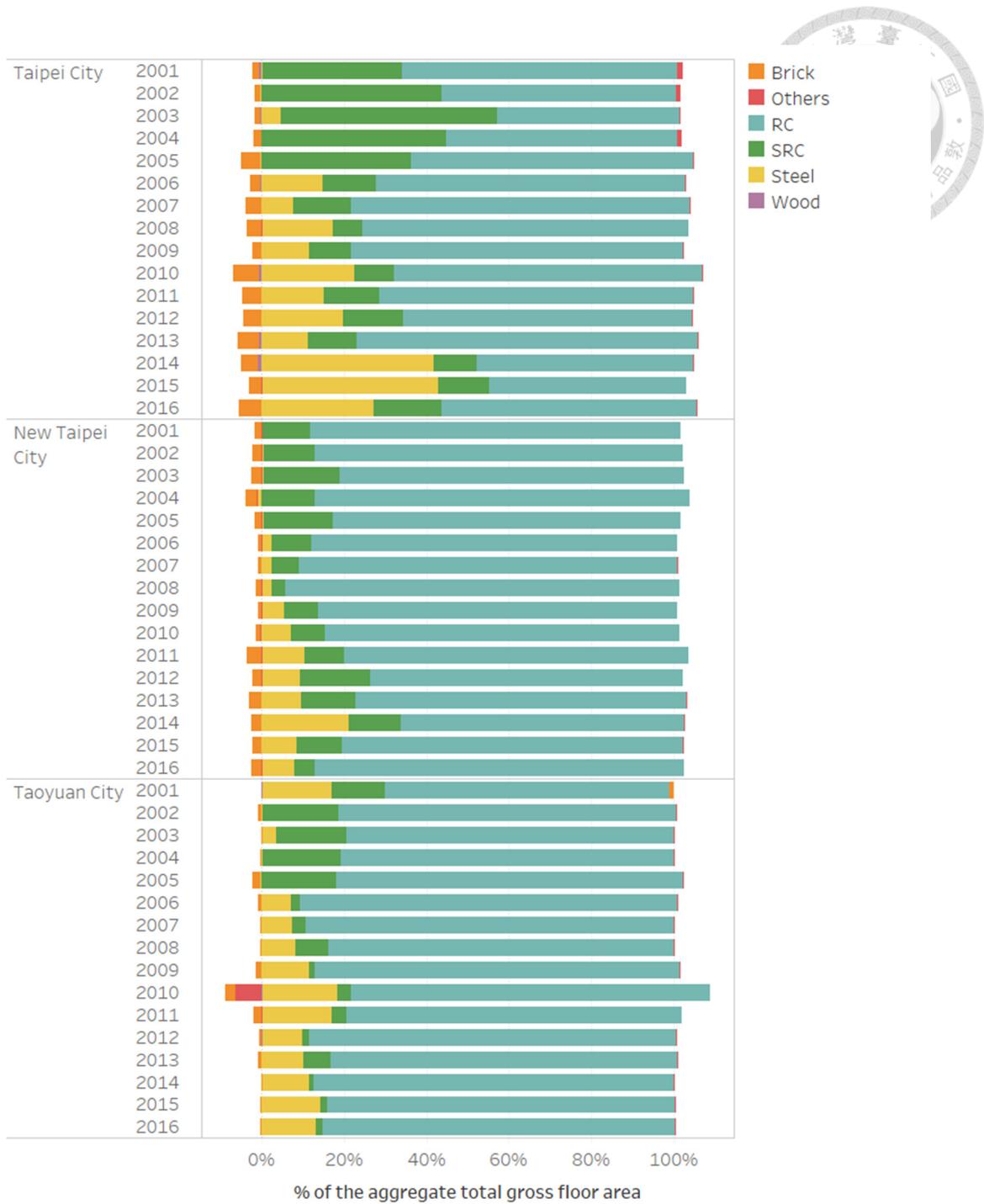


附圖 1-3 (續)

(續下頁)

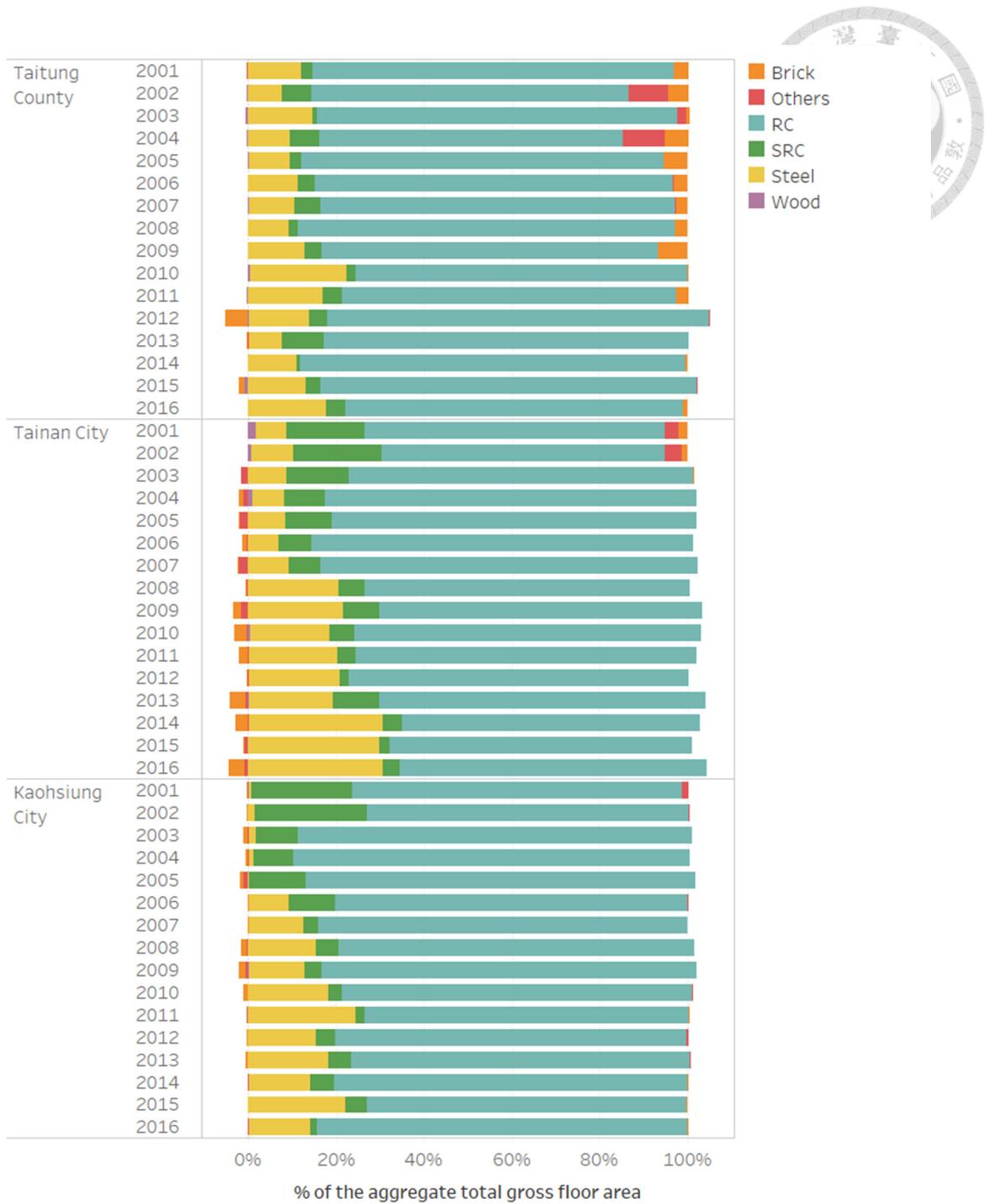


附圖 1-3 (續)



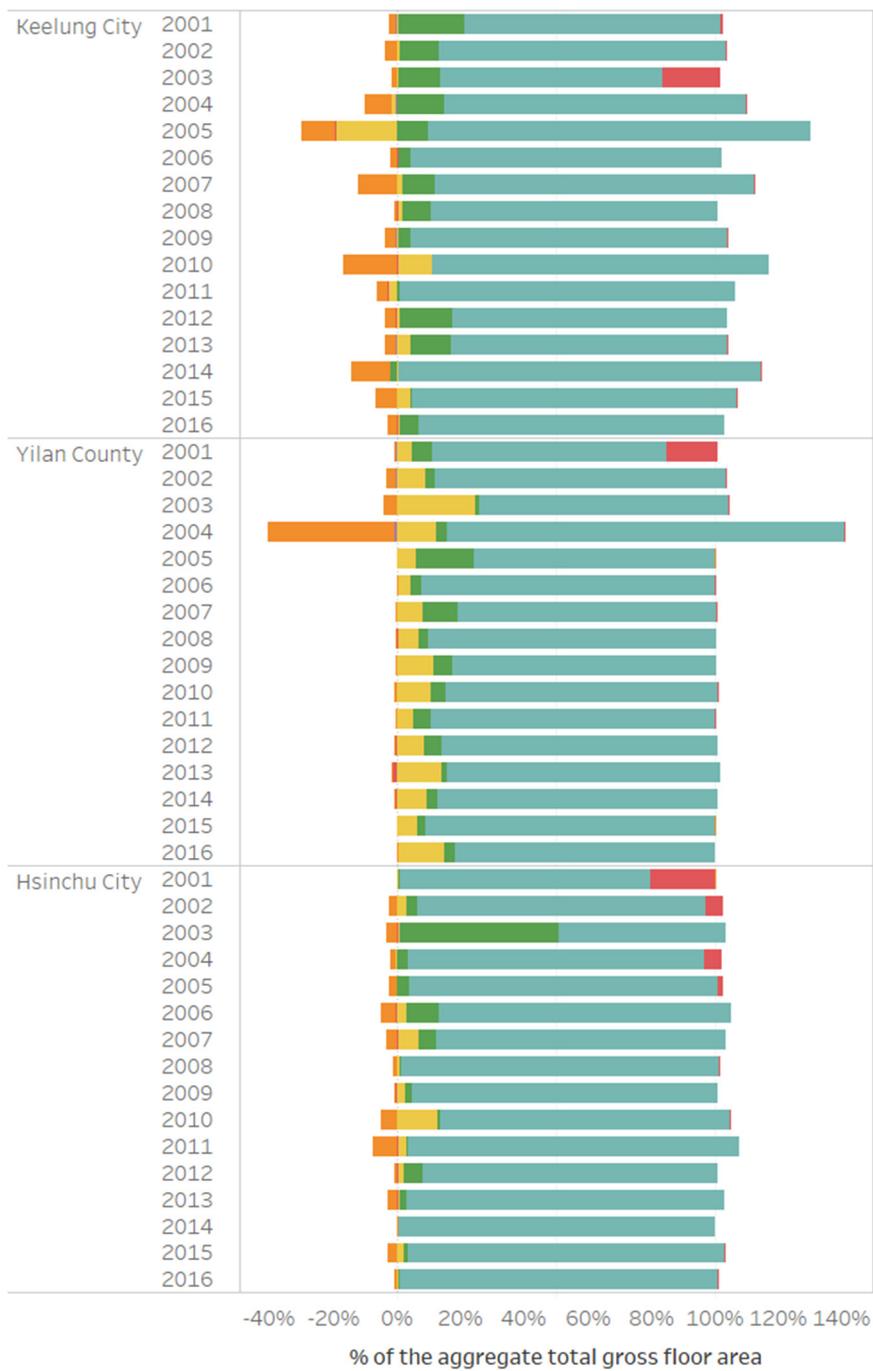
附圖 1-4 臺灣建造和拆除樓地板面積百分比

(續下頁)



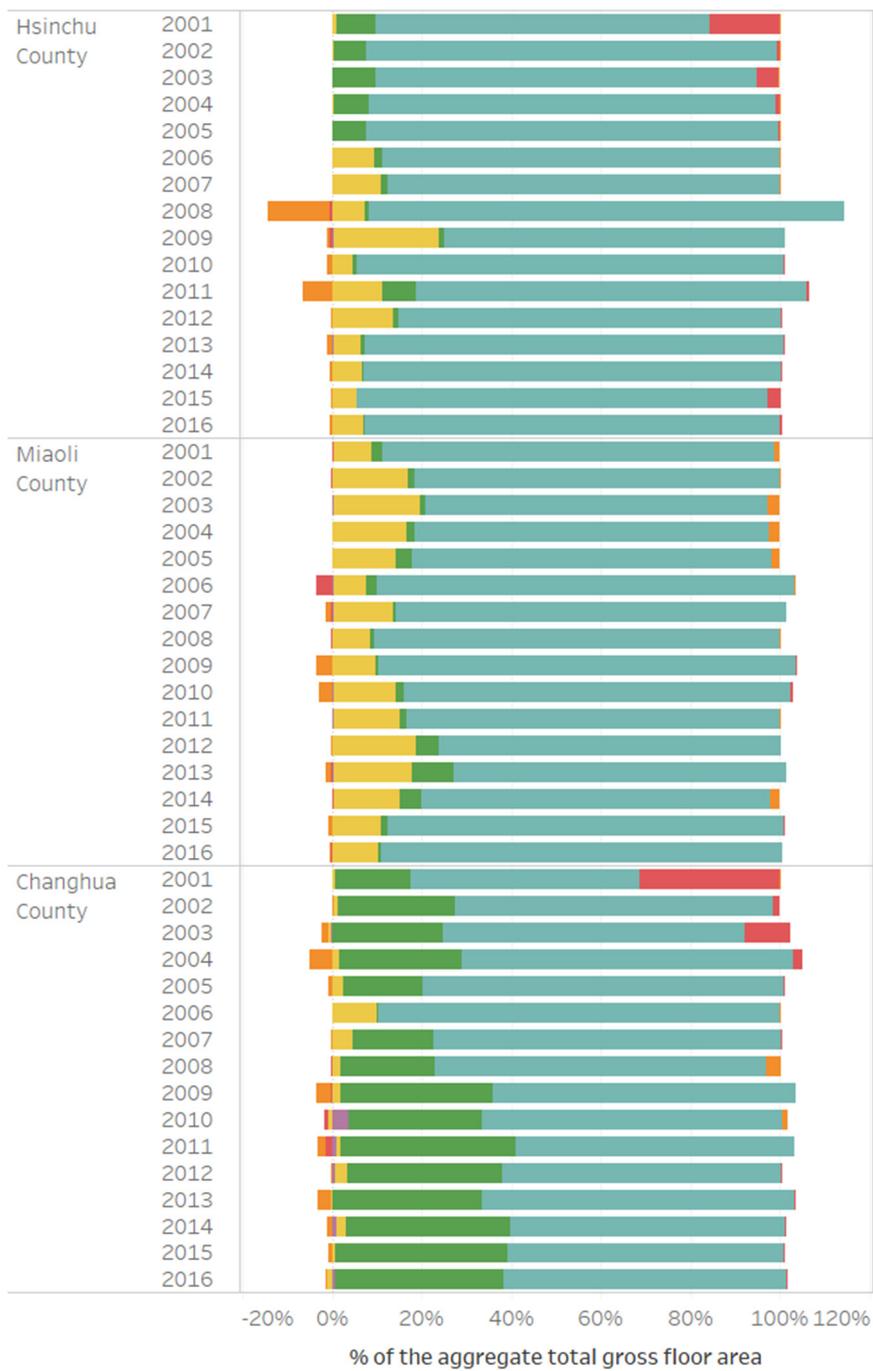
附圖 1-4 (續)

(續下頁)



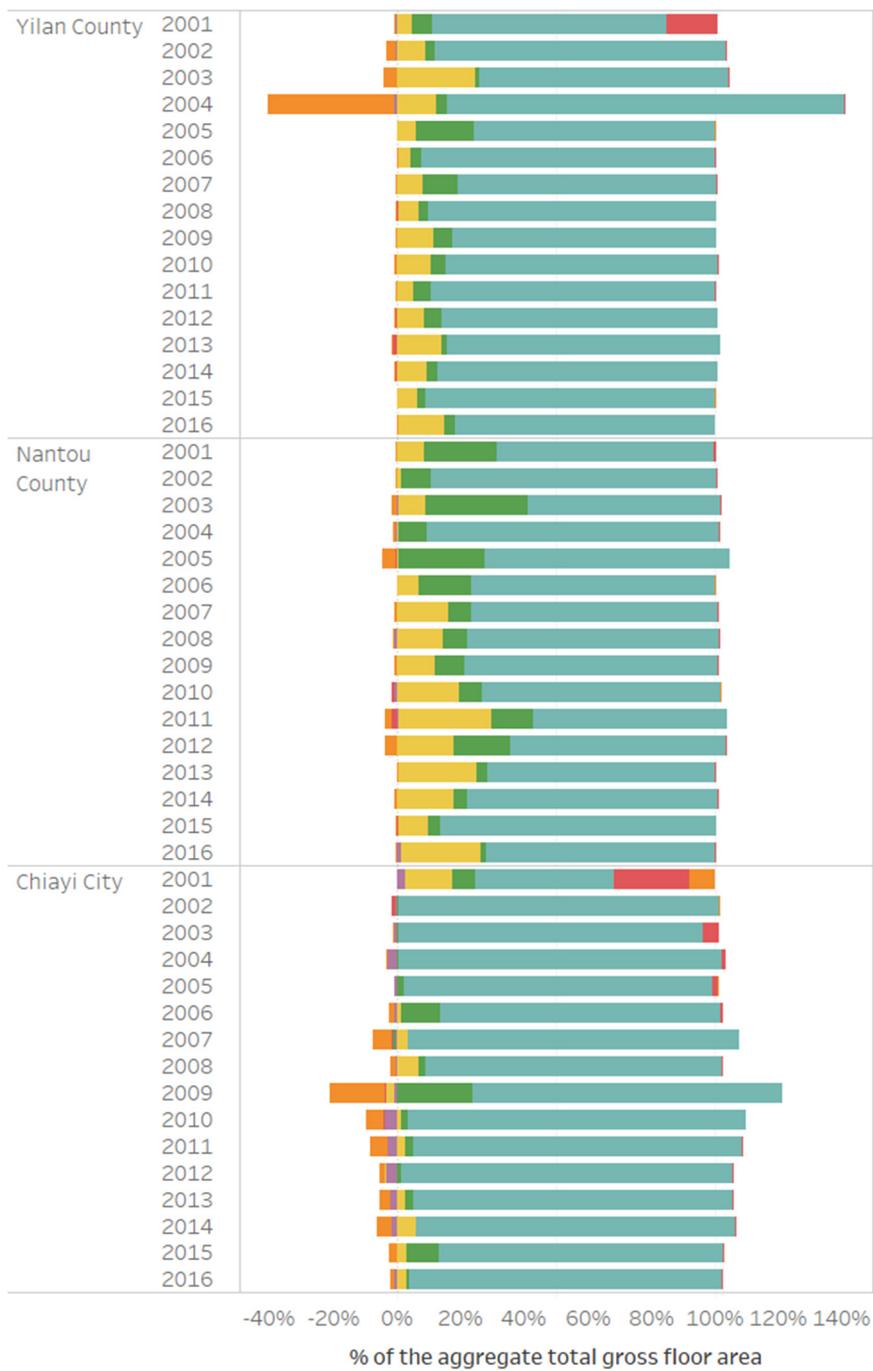
附圖 1-4 (續)

(續下頁)



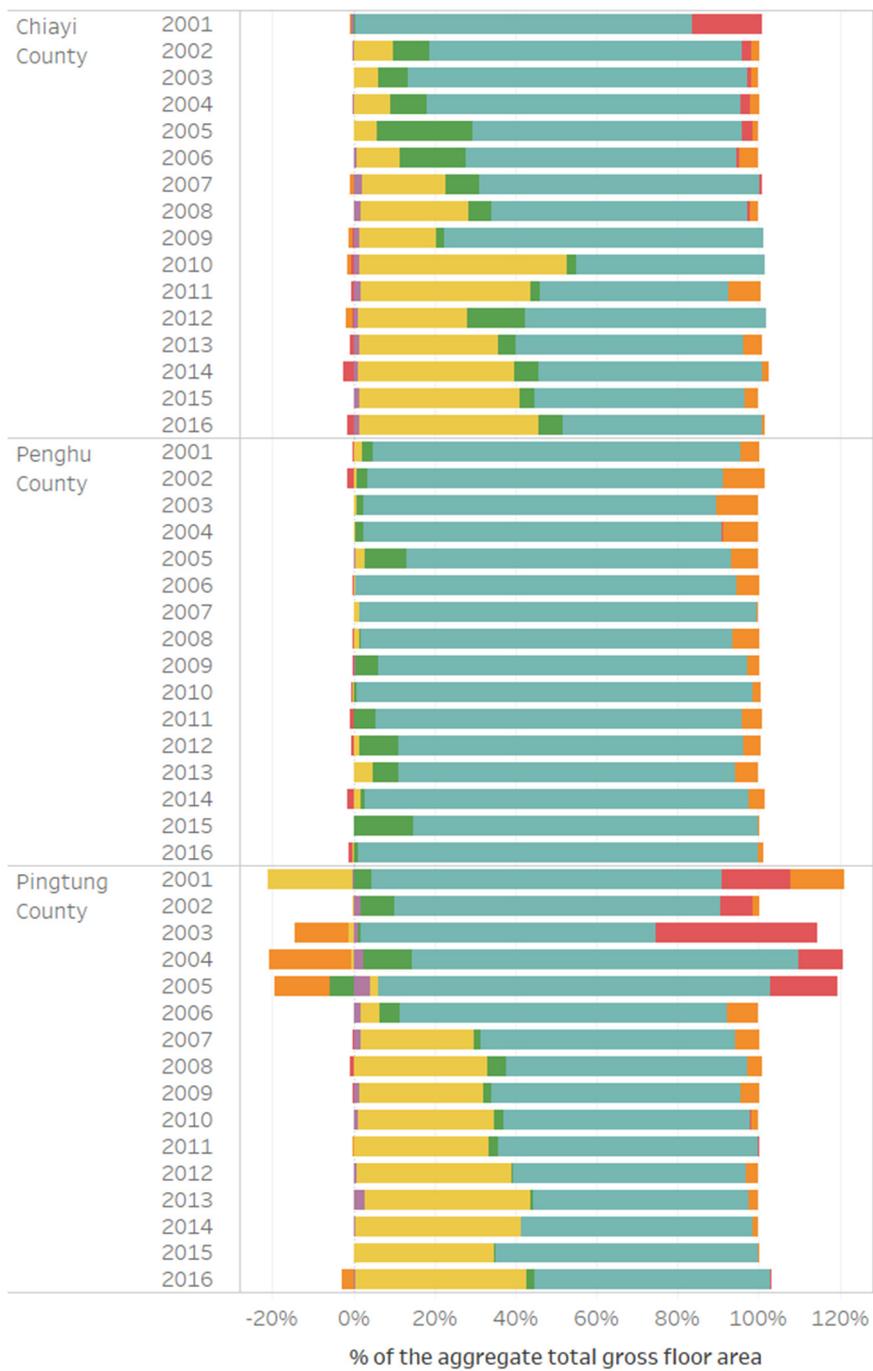
附圖 1-4 (續)

(續下頁)



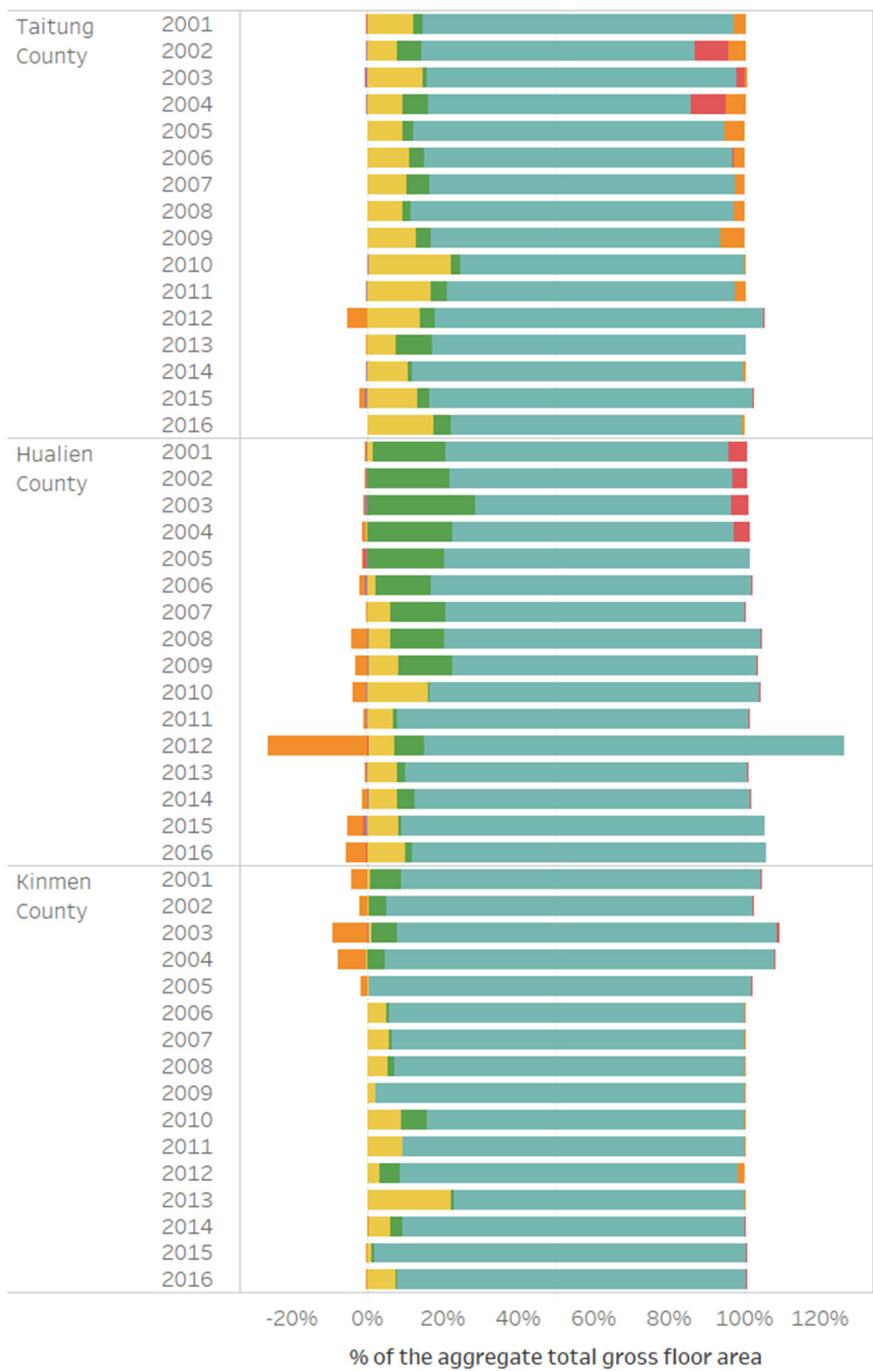
附圖 1-4 (續)

(續下頁)



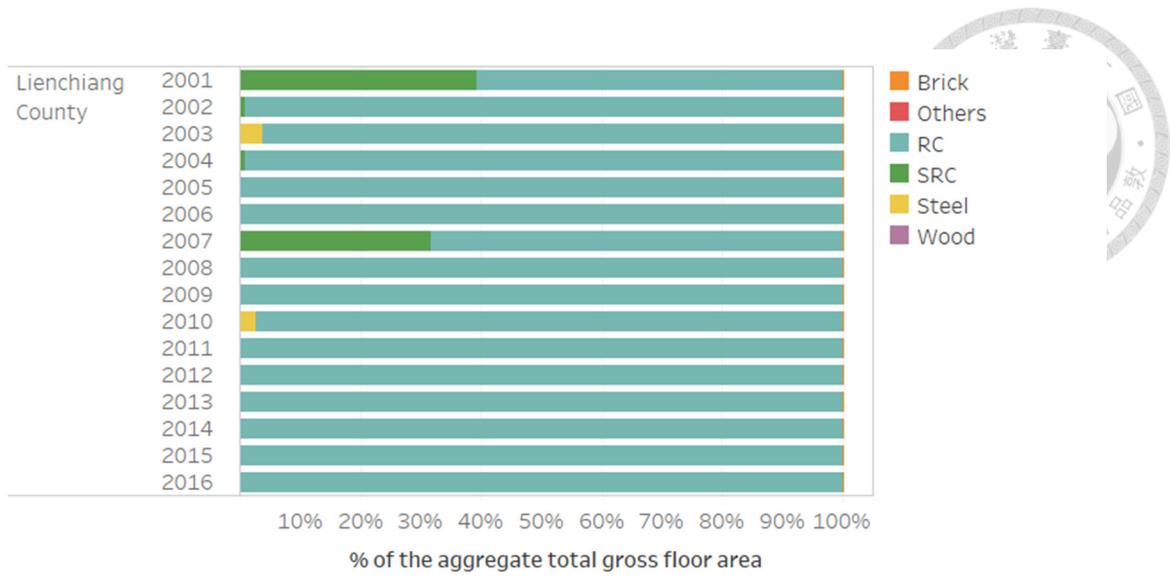
附圖 1-4 (續)

(續下頁)



附圖 1-4 (續)

(續下頁)



附圖 1-4 (續)