

國立臺灣大學生物資源暨農學院生物環境系統工程學系

碩士論文



Department of Bioenvironmental Systems Engineering

College of Bioresource and Agriculture

National Taiwan University

Master's Thesis

生態系服務基礎之水-糧食-能源鏈結永續評估—

以桃園市為例

Evaluation on Ecosystem service based Food - Energy -  
Water Nexus sustainability – A case study of Taoyuan City

張宸瑄

Chen-Hsuan Chang

指導教授：林裕彬 博士

Advisor: Yu-Pin Lin, Ph.D

中華民國 113 年 10 月

October 2024

國立臺灣大學碩士學位論文  
口試委員會審定書

生態系服務基礎之糧食-能源-水鏈結永續評估—以桃園市為例

本論文係張宸瑄R10622044在國立臺灣大學生物環境系統工程學系完成之碩士學位論文，於民國113年04月09日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明。

口試委員 Oral examination committee:

林務林 王淑潔 江莉奇  
(指導教授 Advisor)

系(所、學位學程)主管 Director:

詹國偉



## 謝辭

碩士生活轉瞬間邁入尾聲，在論文書寫過程中有成長、挫折，在學術學習取得進展感到滿足，但也常在寫論文的漫漫長夜感到迷惘，所幸一路上給予我支持的貴人，讓我能努力充實並認真地維持生活平衡，並嘗試生活中各種可能性。

研究一路上要感謝的人很多，首先，我要感謝指導教授林裕彬老師，給予充分自由去探索有興趣的研究，適時提供論文撰寫之原則與方向，讓我對於學術有更深層的了解，在出國交換與研發替代役上也給予鼓勵與協助。感謝口試委員：江莉琪教授與王咏潔教授，提供各種寶貴的修改意見，讓論文得以變得更加完善。感謝亦師亦友地的翁巖老師，讓我面對研究困境獲得不同見解。

接下來感謝研究室大家的協助與支持，讓我得以度過研究的種種關卡，感謝安村提供書寫論文的經驗，讓我建構研究的邏輯與概念；感謝品樺在我軟體遇到困難時不厭其煩的協助，與我討論解決方案；另外一起在 603 奮鬥的夥伴：Shafira、禹辰、佩臻、蘇緯、蕙韻、喬雲、宇彤，此外還有隔壁研究室的泓毅、峻廷、力寬，有大家才讓我順利度過碩士班並完整校園生活。

感謝系辦同仁在行政處理上給予我許多提醒與幫助，讓我能順利口試與繳交論文。感謝一起打羽球、壁球的朋友們，讓我在論文卡關時可以獲得紓壓管道，盡情在球場揮灑汗水。感謝台大慈幼山友社，縱使沒太多時間可以參與，但仍有一群朋友可以偶爾聚聚，帶給我歸屬感與樂趣。感謝堉璘計畫夥伴亞善和均一的大家，從申請計畫到執行計畫給予我很多幫助，促使我能順利出國交換拓展視野。

感謝韋昕陪伴我度過寫論文的日子，每當我不順心時給我鼓勵與支持，陪伴我從無到有寫完這篇論文。同時要感謝父母對我讀碩士全力的支持，讓我在研究之餘沒有後顧之憂，最後也謝謝努力並堅持到現在的自己，希望這段時間的歷練可以成為未來養分，持續朝自己的目標理想前進。

張宸瑄 2024.10



## 摘要

糧食、能源與水（Food, Energy, Water, FEW）為人類生存之核心資源，而三者間形成糧食、能源與水鏈結（Food - Energy - Water Nexus, FEW Nexus），並彼此存在複雜之交互作用，近年在全球人口增長、城市化快速與氣候變遷下，人類對 FEW 等資源之需求急劇上升，因此提高 FEW 永續性成為重要議題。生態系服務（Ecosystem Service, ES）為生態系統提供給人類社會之資源、功能與服務，提供人類生存所需，然而當人類對自然環境的不當利用，將破壞生態系統並降低供給之 ES。

本研究探討桃園市在 2007 年、2014 年、2021 年之 ES 及 FEW 永續性，同時分析 ES 與 FEW Nexus 之相關性，期望藉由降低競合及增強協同效應，改善 FEW Nexus 永續性。本研究使用 ES 綜合評估與權衡模型（Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs model, InVEST）模式計算六項 ES，包含糧食生產、碳儲存、都市降溫、沉積物保留、營養鹽保留、產水量，同時採用區域空間自相關之 Local Moran's I 對 ES 進行熱區分析，並將結果中 High-High 聚集區域定義為該 ES 熱區，定義提供四種以上 ES 熱區之區域視為 ES 綜合熱區。

在計算 FEW Nexus 永續性上，本研究選取 FEW 系統中各五項永續性指標，以熵權重法（Entropy Weight Method）計算 FEW 指標永續性。並利用 Pearson 相關係數分析 FEW 永續性與 ES、FEW 永續性內部與 ES 內部之權衡關係，另外藉由 FEW 永續性與各 ES 間之耦合協調度（Coupling Coordination Degree, CCD），協助探討 FEW Nexus 永續性與各 ES 間之空間分布。

ES 熱區結果顯示桃園市歷年約 23% 之土地為 ES 綜合熱區，然而 2014 年 ES 熱區僅佔整體面積 6.44%，推測為降水空間分布改變所致。ES 中糧食生產、碳儲存、都市降溫、沉積物保留、營養鹽保留皆受土地利用變遷影響，僅產水量因降雨空間分佈而產生顯著時空變異性，進而導致產水量之權衡關係取決於當年降雨，糧食生產與多數 ES 則呈競合關係，其餘 ES 彼此為協同關係。FEW 永續性結果中，歷年能源子系統永續性基本持平，能源及水系統永續性則呈下降趨勢，水與糧食鏈結（W-F）呈現協同、競合兩極化趨勢；水與能源（W-E）、糧食與能源（F-E）之未



分類比例偏高，顯示能源與其他子系統相關性較低。

糧食子系統永續性歷年皆與糧食生產呈高度顯著、高度協同關係，糧食生產熱區之高耦合協調度驗證其協同關係；能源子系統與六項 ES 皆不顯著；水子系統永續性歷年與碳儲存、沉積物保留間存在高度顯著與高度協同關係；FEW 永續性則與產水量權衡關係與顯著性歷年變動劇烈。將 ES 热區結果結合 FEW 永續性研究，發現 ES 热區與能源、水子系統高永續性區域高度重疊，與糧食子系統重疊區域永續性較低。

本研究為國內首篇以城市鄉鎮區為尺度討論 ES 與 FEW 永續性之研究，以 ES 為框架探討 FEW Nexus 永續性空間分佈，透過劃定熱區與權衡關係分析，強化 ES 與 FEW Nexus 管理，提供政府制定政策之依據，進而實踐 ES 與 FEW Nexus 永續經營目標。

關鍵字：生態系服務、永續性指標、糧食能源與水鏈結、生態系服務熱點、  
InVEST 模式



## Abstract

Food, energy, and water (FEW) are essential resources for human survival, forming the Food-Energy-Water Nexus (FEW Nexus), characterized by complex interactions. In recent years, with rapid global population growth, urbanization and climate change, the demand for these resources has sharply increased. It makes enhancing the sustainability of the FEW Nexus a critical issue. Ecosystem Services (ES) refer to the resources, functions, and services provided by ecosystems to human society, fulfilling fundamental human needs. However, improper human exploitation of the natural environment can degrade ecosystems and diminish the provision of ES.

This study investigates the sustainability of ES and the FEW Nexus in Taoyuan City in 2007, 2014, and 2021. It also analyzes the correlation between ES and FEW Nexus, aiming to enhance sustainability by reducing competitions and promoting synergistic effects. The study utilizes InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs model) to calculate six ESs, including food production, carbon storage, urban cooling, sediment retention, nutrient retention, and water yield. Additionally, the study conducts hotspot analysis of ES using Local Moran's I spatial autocorrelation, defining regions with High-High clustering as ES hotspots and regions providing four or more ES as ES composite hotspots.

As for FEW sustainability, five sustainable indicators are selected for food, energy, water subsystem. Entropy Weight Method is applied to calculate the sustainability of FEW Nexus indicators. Pearson correlation coefficients are employed to analyze the relationships between FEW sustainability and ES, as well as the trade-offs within FEW sustainability and ES. Furthermore, the Coupling Coordination Degree (CCD) between FEW sustainability and each ES is utilized to explore the spatial distribution of FEW sustainability and ES coupling.

The results of ES hotspots indicate that approximately 23% of the land area in Taoyuan City is categorized as ES composite hotspots over the years. However, in 2014, ES hotspots only accounted for 6.44% of the total area, suggesting a change in precipitation spatial distribution. ES including food production, carbon storage, urban cooling, sediment retention, and nutrient retention are all influenced by land use changes.



Only water yield exhibits significant spatiotemporal variability due to changes in rainfall spatial distribution, leading to the weighting relationship of water yield depending on the precipitation in a given year. Food production competes with most ES components, while the remaining ES components exhibit synergistic relationships with each other.

Regarding FEW sustainability, the sustainability of the energy subsystem has remained relatively stable over the years, while the sustainability of the food and water subsystems shows a declining trend. The water-food (W-F) nexus demonstrates a polarization trend of both synergy and competition, while the proportions of unclassified relationships between water-energy (W-E) and food-energy (F-E) are relatively high, indicating lower correlations between energy and other subsystems.

The sustainability of the food subsystem has consistently exhibited a highly significant and synergistic relationship with food production over the years, as evidenced by the high coupling coordination degree in the hotspots of food production. However, the energy subsystem has shown no significant relationship with the six ES. In contrast, the sustainability of the water subsystem has demonstrated a highly significant and synergistic relationship with carbon storage and sediment retention over the years, while the relationship between sustainability and water yield has varied significantly over time. Integrating the results of ES hotspots with FEW sustainability research, it was found that areas with high sustainability of energy and water subsystems highly overlap with ES hotspots, whereas the overlap with the food subsystem indicates lower sustainability.

This study represents the first attempt in Taiwan to discuss the sustainability of ES and FEW at the scale of district areas. By employing ES as a framework to analyze the spatial distribution of FEW Nexus sustainability, and through hotspot delineation and weighting relationship analysis, this research strengthens the management of ES and FEW Nexus. And it also provides a basis guideline for government policy to achieve the goals of sustainable management of ES and FEW Nexus.

**Keyword :** Ecosystem Service, Sustainable Indicator, Food, Energy and Water Nexus, Ecosystem Service Hotspot, InVEST model



## 目次

謝辭 .....	i
摘要 .....	ii
Abstract .....	iv
目次 .....	vi
圖次 .....	ix
表次 .....	xi
第一章 、前言 .....	1
1.1 研究背景 .....	1
1.2 研究目的 .....	2
1.3 研究架構 .....	3
第二章 、文獻回顧 .....	5
2.1 糧食-能源-水鏈結 .....	5
2.2 生態系服務 .....	7
2.3 土地利用與土地覆蓋 .....	9
2.4 生態系服務熱區 .....	10
2.5 永續性指標 .....	11
第三章 、研究方法與步驟 .....	13
3.1 研究區簡介 .....	13
3.2 生態系服務量化 .....	19
3.2.1 糧食生產 .....	20
3.2.2 沉積物保留 .....	20
3.2.3 碳儲存 .....	23
3.2.4 都市降溫 .....	24
3.2.5 計養鹽遞移 .....	25
3.2.6 產水量 .....	28



3.2.7	區域空間自相關 .....	29
3.3	糧食、能源與水系統永續性 .....	32
3.3.1	糧食子系統 .....	32
3.3.2	能源子系統 .....	33
3.3.3	水子系統 .....	35
3.3.4	永續性量化指標 .....	38
3.4	協調度與權衡關係分析 .....	41
3.4.1	耦合協調度 .....	41
3.4.2	權衡關係 .....	42
	第四章 、結果與討論 .....	44
4.1	生態系服務分布模擬 .....	44
4.1.1	糧食生產 .....	44
4.1.2	沉積物遞移 .....	46
4.1.3	碳儲存與吸存 .....	47
4.1.4	都市降溫 .....	49
4.1.5	營養鹽遞移 .....	50
4.1.6	產水量 .....	52
4.1.7	ES 热區結果 .....	53
4.1.8	ES 热區討論 .....	58
4.1.9	ES 權衡關係 .....	59
4.2	FEW 永續性指標評估 .....	61
4.2.1	資料計算驗證 .....	61
4.2.2	永續性指標 .....	62
4.2.3	熱區內外之永續性 .....	66
4.2.4	FEW 永續性權衡關係 .....	67
4.2.5	FEW 永續性權衡關係討論 .....	70
4.3	永續性與生態系服務之關係評估 .....	72



4.3.1	耦合協調度結果 .....	72
4.3.2	耦合協調度討論 .....	75
4.3.3	權衡關係結果 .....	77
4.3.4	權衡關係討論 .....	78
<b>第五章</b>	<b>、結論與建議 .....</b>	<b>81</b>
5.1	結論 .....	81
5.2	建議 .....	83
<b>參考文獻 .....</b>	<b>84</b>	



## 圖次

圖 1、本研究研究架構圖 .....	4
圖 2、桃園市地勢與研究區範圍 .....	14
圖 3、桃園市行政分區與區域發展 .....	14
圖 4、桃園市 2007 年全區 LULC 分布情形 .....	16
圖 5、桃園市 2014 年全區 LULC 分布情形 .....	16
圖 6、桃園市 2021 年全區 LULC 分布情形 .....	17
圖 7、桃園市 2007 年、2014 年、2021 年各類 LULC 類型所佔比例 .....	18
圖 8、稻米與甘薯 2007 年、2014 年、2021 年與三年合併分布 .....	45
圖 9、糧食生產合併分布區域及歷年糧食產量變化圖 .....	45
圖 10、糧食生產 2007 年、2014 年、2021 年行政區分布 .....	46
圖 11、2007 年、2014 年、2021 年沉積物保留分布 .....	46
圖 12、沉積物保留合併分布區域及歷年沉積物保留量變化圖 .....	47
圖 13、沉積物保留 2007 年、2014 年、2021 年行政區分布 .....	47
圖 14、2007 年、2014 年、2021 年碳儲存分布 .....	48
圖 15、碳儲存合併分布區域及歷年碳儲存量變化圖 .....	48
圖 16、碳儲存 2007 年、2014 年、2021 年行政區分布 .....	48
圖 17、2007 年、2014 年、2021 年都市降溫分布 .....	49
圖 18、都市降溫合併分布區域及歷年熱調適指數變化圖 .....	49
圖 19、都市降溫 2007 年、2014 年、2021 年行政區分布 .....	50
圖 20、2007 年、2014 年、2021 年氮與磷保留能力與歷年合併分布 .....	51
圖 21、營養鹽保留合併分布區域及歷年營養鹽保留量變化圖 .....	51
圖 22、營養鹽保留 2007 年、2014 年、2021 年行政區分布 .....	51
圖 23、2007 年、2014 年、2021 年產水量分布 .....	52
圖 24、2007 年、2014 年、2021 年年降雨量分布 .....	52
圖 25、產水量合併分布區域及歷年產水量變化圖 .....	53
圖 26、產水量 2007 年、2014 年、2021 年行政區分布 .....	53



圖 27、2007 年、2014 年、2021 年 ES 種類數量分布 .....	54
圖 28、2007 年、2014 年、2021 年 ES 數量所占比例 .....	55
圖 29、2007 年、2014 年、2021 年熱區分佈 .....	55
圖 30、2007 年各行政區 ES 數值 .....	56
圖 31、2014 年各行政區 ES 數值 .....	57
圖 32、2021 年各行政區 ES 數值 .....	57
圖 33、2007 年、2014 年、2021 年糧食子系統永續性指標分佈 .....	63
圖 34、2007 年、2014 年、2021 年能源子系統永續性指標分佈 .....	63
圖 35、2007 年、2014 年、2021 年水子系統永續性指標分佈 .....	63
圖 36、研究區 2007 年、2014 年、2021 年 FEW 永續性 .....	64
圖 37、桃園市各行政區之糧食子系統永續性 .....	65
圖 38、桃園市各行政區之能源子系統永續性 .....	65
圖 39、桃園市各行政區之水子系統永續性 .....	65
圖 40、2007 年、2014 年、2021 ES 熱區內外之永續性比較 .....	66
圖 41、2007 年 FEW 指標間權衡關係（協同、未分類和競合）之百分比 .....	68
圖 42、2014 年 FEW 指標間權衡關係（協同、未分類和競合）之百分比 .....	69
圖 43、2021 年 FEW 指標間權衡關係（協同、未分類和競合）之百分比 .....	69
圖 44、2007 年、2014 年、2021 年糧食生產與 FEW 永續性之協調度 .....	73
圖 45、2007 年、2014 年、2021 年沉積物保留與 FEW 永續性之協調度 .....	73
圖 46、2007 年、2014 年、2021 年碳儲存與 FEW 永續性之協調度 .....	74
圖 47、2007 年、2014 年、2021 年都市降溫與 FEW 永續性之協調度 .....	74
圖 48、2007 年、2014 年、2021 年營養鹽保留與 FEW 永續性之協調度 .....	75
圖 49、2007 年、2014 年、2021 年產水量與 FEW 永續性之協調度 .....	75



## 表次

表 1、LULC 分類代碼對照表.....	15
表 2、桃園市 2021 年之 LULC 面積及百分比.....	17
表 3、InVEST 模式對應 FEW Nexus .....	19
表 4、各土地利用類型之沉積物保留參數表 .....	22
表 5、各 LULC 之碳庫儲存量（單位：Mg/ha） .....	23
表 6、各 LULC 環境因子參數表.....	25
表 7、各 LULC 之營養鹽保留參數表.....	28
表 8、FEW 永續性指標.....	37
表 9、CCD 型態分類.....	42
表 10、Pearson 相關係數型態分類 .....	43
表 11、稻米 2007 年、2014 年、2021 年實際產量與模擬產量之比較 .....	44
表 12、2007 年 ES 之間 Pearson 相關係數.....	59
表 13、2014 年 ES 之間 Pearson 相關係數.....	60
表 14、2021 年 ES 之間 Pearson 相關係數.....	60
表 15、2007 年、2014 年、2021 年桃園市與台灣 GDP 四大項目組成佔整體 GDP 比例與人均 GDP 數值 .....	62
表 16、2007 年、2014 年、2021 ES 熱區與桃園市永續性 .....	66
表 17、2007 年、2014 年、2021 永續性指標之相關係數 .....	67
表 18、2007 年 FEW 永續性與 ES 之權衡關係 .....	77
表 19、2014 年 FEW 永續性與 ES 之權衡關係 .....	78
表 20、2021 年 FEW 永續性與 ES 之權衡關係 .....	78



## 第一章 、前言

### 1.1 研究背景

糧食、能源與水 (Food Energy Water, FEW) 為人類生存之核心資源，近年在全球人口增長、城市化快速與氣候變遷之下，人類對 FEW 等資源之需求急劇上升，2050 年糧食消耗量增長 60%，能源消耗量則將增長 50%，全球灌溉用水總量預計將增加 10%，面對高度成長的資源需求，將對 FEW 資源供應施加極大壓力 (Silva, 2012; Sourmehi, 2021)。

為確保 FEW 資源供應之永續性，研究必須探討糧食、能源與水鏈結 (Food - Energy - Water Nexus, FEW Nexus)，藉由了解環境、經濟和環境如何影響相互作用，以管理 FEW Nexus 間之協同與競合作用(Endo et al., 2017)。

ES (Ecosystem Service, ES) 為生態系統提供給人類社會之資源、功能與服務，提供人類生活、生存所需，然而當人類對自然環境的不當利用，以及土地過度開發，將破壞生態系統並降低其供給之 ES。過去研究對 ES 與社會經濟系統間相互作用進行分析，使基於生態系統之地方管理愈加廣泛，考慮許多人類活動對生態系統服務生產之累積影響，將生態研究納入當地或區域決策(Mach et al., 2015)。

由於 ES 與 FEW Nexus 皆關注自然資源與人類社會經濟活動之供給互動，因此將 ES 納入 FEW Nexus 分析框架將有助於了解 ES 如何影響永續性之穩定，此外，ES 與 FEW Nexus 間存在權衡關係，由協同作用實現雙贏的解決方案，識別資源間之競合關係，進而針對問題制定相應的政策和措施(Karabulut et al., 2019)。綜合而言分析釐清 ES 與 FEW 關係對永續發展影響至關重要，需要對 ES 如何促進永續性進行探討與實作(Yuan & Lo, 2020)。

現有研究缺乏 ES 與 FEW Nexus 關係之討論(Hanes et al., 2018)，且研究集中在全球、跨國和國家尺度，缺乏城市尺度的觀察(Zhang et al., 2019)，臺灣目前沒有針對 ES 與 FEW Nexus 關係，探討城市永續性之研究，若能深入研究 ES 與 FEW Nexus 之相關性，將能為生態資源管理措施提供重要資訊。

本研究量化 ES 與 FEW Nexus，透過建立永續性評估指標系統量化永續性，同



時計算六種 ES 空間分布，以進行 ES 與 FEW Nexus 之相關性分析，藉此探討桃園市 ES 與 FEW Nexus 之資源永續發展現狀，提供政府未來永續經營之政策參考依據。

## 1.2 研究目的

本研究研究區域為桃園市，桃園市工商產業快速發展，工業產值位居台灣首位，且近年人口增長快速，成為台灣都市化最快之區域，然而城市大規模開發使土地利用改變，ES 與各種資源永續性降低，衝擊人類未來生活與發展。本研究目標探索並評估桃園市在 2007 年、2014 年、2021 年之 ES 及 FEW 永續性，同時釐清 ES 與 FEW 永續性關係，期望促進城市資源永續發展。研究目的詳細如下所列：

1. 量化桃園市 ES：

利用 InVEST 模式量化桃園市六種 ES，包括糧食生產、碳儲存、都市降溫、沉積物保留、營養鹽保留與產水量，以進行 ES 間權衡關係。

2. ES 熱區分析：

利用區域空間自相關之 Local Moran's I 法，對 ES 進行熱區分析，並定義高值聚集區域為該年 ES 熱區，利用疊加六項 ES 熱區，得出 ES 綜合熱區。

3. 量化 FEW 永續性指標：

選取 FEW 子系統中各五項相關之永續性指標，進而計算出 FEW 指標之永續性，以此觀察 FEW 永續性之空間分佈。

4. 分析 ES 與 FEW 永續性之權衡關係：

經由計算 Pearson 相關係數，探討 ES 間、FEW 永續性間、ES 與 FEW 永續性之權衡關係，另外利用 CCD 法評估 ES 與 FEW 永續性間之協調度空間分布。



### 1.3 研究架構

本研究整體架構如圖 1 所示，詳細流程敘述如下：

1. 量化及比較 2007 年、2014 年、2021 年之 ES
  - a. 蒐集 InVEST 模式中所需空間分布資料、相關模式之參數。
  - b. 使用 InVEST 模式計算 ES，模式包含糧食生產、碳儲存、都市降溫、沉積物遞移、營養鹽遞移、產水量。
  - c. 將 InVEST 輸出結果標準化以進行 ES 間比較。
2. 分析 2007 年、2014 年、2021 年 ES 热區
  - a. 使用區域空間自相關 Local Moran's I 分別對各年 ES 進行熱區分析，並將 Local Moran's I 結果中 High-High 聚集區域定義為 ES 热區。
  - b. 將各 ES 三個歷史年份之熱區聯集區域視為穩定提供該 ES 之熱區。
  - c. 疊加六種 ES 热區，並將提供四種以上 ES 热區區域視為 ES 綜合熱區。
3. 量化 FEW 指標
  - a. 在 FEW 系統中各選取五項永續性指標。
  - b. 蒐集永續性指標所需資料計算出指標數值。
  - c. 採用熵權重法計算各指標間權重，將權重各自與指標相乘後加總，得出 FEW 永續性。
  - d. 比較 ES 热區內與桃園市整體之 FEW 永續性差異。
4. 分析 ES 間、FEW 永續性間之權衡關係
  - a. 計算 Pearson 相關係數，探討 ES 間、FEW 永續性間之權衡關係
  - b. 比較桃園市 2007 年、2014 年、2021 年 ES、FEW 永續性權衡變化。



## 5. 評估 ES 與 FEW Nexus 之關係

- 計算 Pearson 相關係數與  $p$  值，探討 FEW 永續性與 ES 間之權衡關係與顯著性。
- 比較桃園市 2007 年、2014 年、2021 年 ES 之權衡變化。
- 應用 CCD 方法評估關鍵 ES 與 FEW Nexus 永續發展之空間分布。

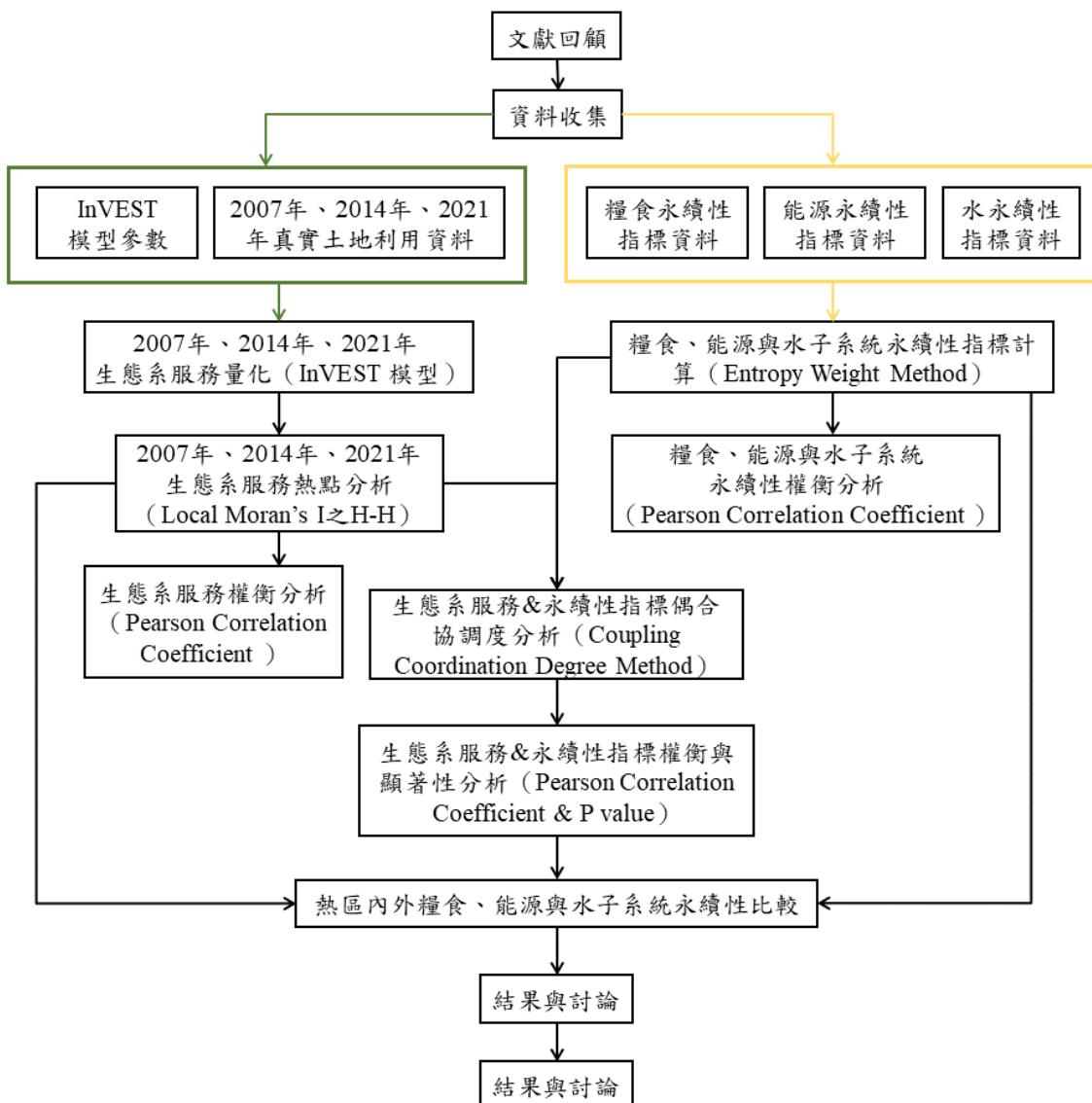


圖 1、本研究研究架構圖



## 第二章 、文獻回顧

### 2.1 糧食-能源-水鏈結

FEW 是人類生存發展不可或缺之資源，資源間存在鏈結並彼此相互影響，在全球對自然資源需求增加，加上氣候變遷造成之供給減少，糧食-能源-水鏈結 (Food Energy Water Nexus, FEW Nexus) 正面臨失衡。為滿足世界人口之快速增長，聯合國糧食與農業組織 (Food and Agriculture Organization, FAO) 預計 2050 年會需要多生產 60% 之糧食，同時間全球灌溉用水總量預計將增加 10% (Silva, 2012)；美國能源資訊管理局 (U.S. Energy Information Administration, EIA) 估計 2050 年全球能源消耗預計將增長 50% (Sourmehi, 2021)。

糧食、能源與水鏈結 (Food - Energy - Water Nexus, FEW Nexus) 近年來受到廣泛關注(Endo et al., 2017)，國際上針對 FEW Nexus 間關聯性已形成共識，2009 年世界經濟論壇 (World Economic Forum, WEF) 正式把這三者列入氣候變遷之風險因子，並在 2011 年強調指出，地下水枯竭所代表之水資源缺乏，已經對世界許多地方產生衝擊(World Economic Forum, 2011)。同年波昂會議以「The Water, Energy and Food Security Nexus - Solutions for a Green Economy」，將綠色經濟與 FEW Nexus 結合，並在隔年讓 FEW Nexus 納入聯合國永續發展「Rio2012」國際議程 (Bonn, 2011) 。

2011 年至 2015 年間，全球近 300 個組織發起 FEW Nexus 倡議(Endo et al., 2017)，在學術研究上提及 FEW Nexus 論文之數量大幅增加，美國、中國與英國提供大量相關研究(Bian & Liu, 2021)。根據 Web of Science 資料庫，1970 年至 2017 年間提及 469 篇論文，其中論文大部分發表在波昂會議後(Zhang et al., 2019)。

在《未來地球 2025 年願景》中，確定八項關鍵挑戰之優先順序，而 FEW Nexus 是其中之一，FEW Nexus 願景中提到「希望透過了解環境、經濟和環境如何影響相互作用，為所有人提供水、能源與糧食，並管理之間之協同作用與權衡」，凸顯 FEW Nexus 與環境與經濟、環境間之影響(Endo et al., 2017)。資源安全、資源優化管理、氣候變遷調適和政策制定是關係研究之主要議題(Rezaei Kalvani &



Celico, 2023)，政策制定上，政策制定者採用 FEW Nexus 之策略，除了資源利用效率外，使用共用標準減少差異，從經濟、環境與社會角度提供管理方案，讓不同利害關係人參與，逐步實踐 FEW Nexus 達到永續發展(Bian & Liu, 2021)。

地理整體框架闡述 FEW Nexus 在國家內部鏈結之重要性，同時顯示國家進行國際合作以達到 FEW Nexus 安全之重要性。FEW Nexus 對於永續發展至關重要，因其中產生之效益超過交易成本，並減少為整合不同領域而必須做出權衡(Abulibdeh & Zaidan, 2020)。然而目前大多數關於 FEW 關係之研究集中在全球、跨國和國家尺度上，較少關注城市尺度(Zhang et al., 2019)。

Bian and Liu (2021)整理研究中常用 FEW Nexus 模型，並將亞洲、歐洲、美洲和非洲作為案例研究，說明 FEW Nexus 之複雜性，及其如何對城市永續發展造成重大挑戰。城市常被置於永續發展核心，在未來世界都市化日益增加下，資源安全會面臨風險，進而造成鏈結出現問題，城市是 FEW 分配、消費、小程度生產與再利用之區域，大量與周圍地區互動之複雜性，使城市可能成為 FEW Nexus 關鍵節點(Zhang et al., 2019)。同時考量城市化鏈結可有效提升綜合管理之全面性，例如在智慧城市中有考量 FEW Nexus，讓智慧城市更具包容力與活動，成為城市治理之新興範例(Artioli et al., 2017)。

FEW Nexus 目前研究在歐洲主要集中在水資源缺乏地區，著重在解決水資源缺少問題，而在水資源豐富地區則重視能源生產及能源與產水量之鏈結，水資源水質、土地、氣候、生態系統等其他資源被長期忽視，也缺乏標準化之 FEW Nexus 評估架構，尤其目前仍缺乏氣候變遷對 FEW Nexus 影響之相關研究。Rezaei Kalvani and Celico (2023)將水資源、能源、糧食、土地與氣候等因素納入考慮，建立水質水量-能源-糧食-土地-氣候鏈結 (Water quantity and quality - Energy - Food - Land and Climate , WqEFLC nexus)，在沒有全球性適用之 FEW Nexus 框架之情況之下，提高處理資源問題之有效性。

另外使用基於自然之解決方案 (Nature-based solutions , NBS) ，可以節約資源並適應各種社會挑戰，並同時提供經濟、社會和環境效益，是 FEW Nexus 提供解決方案之解方之一，然而效益量化指標無法完整進行深入分析，未來應該開發 FEW



Nexus 指標框架，以協助決策制定(Carvalho et al., 2022)。

## 2.2 生態系服務

生態系統為個體提供具特定功能且必要之服務，稱為生態系服務（Ecosystem Service, ES），ES 蘊含供給（Provisioning）、支持（Supporting）、調節（Regulating）、文化（Cultural）之四大項功能，可藉由基因多樣性、物種豐富度、生物交互作用等構成生物多樣性功能，轉而提供人類及社會經濟系統服務，產生之效益即為 ES，ES 利用直接價值或間接價值方法進行量化，成為有效管理 ES 與制定相關決策之關鍵 (Mach et al., 2015)。

ES 在千禧年生態系統評估中被納入生物多樣性相關政策，且與全球、區域與國家層級上與相關領域之政策、商業決策與永續經濟策略產生鏈結，顯示在保護生態系統、生物多樣性下，達到永續利用 ES 需要跨領域之永續管理策略方能實行。

為了在決策過程能強化不同資源之互補性，過去研究引入鏈結之方法，將同為人類基本需求之能源、糧食及水與 ES 結合，研究建立生態系統-水-能源-糧食鏈結，另一方面從 ES 觀點切入分析 FEW Nexus 與氣候、土地間之鏈結，分析水-能源-糧食-土地-氣候間之關係，深入了解 FEW 子系統之相互作用，論證其中之人為壓力源將如何影響 ES (van den Heuvel et al., 2020)。

強化 ES 與 FEW Nexus 關係有助於促進整體規劃，並協助確認政策策略，關係可能為協同（Synergy），協同效應可以帶來「雙贏」之解決方案，而當服務相互抵觸會需要進行競合（Trade off），以確定在相互競爭之需求中將 ES 做出最佳分配 (Karabulut et al., 2019)。目前政府機構開始注重將 ES 資訊納入決策之重要性，然而在 FEW Nexus 框架之下，對於 ES 與 FEW 永續性尚未得到充分討論(Hanes et al., 2018)。

Yuan and Lo (2020)評估各城市能源、糧食和水資源永續性，利用生物物理價值 (biophysical value) 計算六項 ES，ES 分別是碳匯（Carbon Sequestration）、防洪調適（Flood Regulation）、授粉（Pollination）、沉積物調節（Sediment Regulation）、糧食生產（Food Production）與娛樂（Recreation），經過 p 值檢定與 Pearson 相關



係數迴歸後，在  $\alpha = 0.05$  之顯著性水準下，糧食永續性主要與防洪調適、授粉、沉積物調節、糧食生產相關；能源永續性與碳匯相關；而水資源永續性與防洪調適有關。Sahle et al. (2019)則將產水量 (Water Yield) 、沉積物傳遞 (Sediment Delivery) 定義為水相關 ES，將其對應到水資源永續性。

近年來，相關研究主要集中在 ES 供需之量化和空間化、平衡和空間分佈，方法包含生態過程模擬、生態價值當量法、土地利用估算、專家評估矩陣法、生態模型等主要用於 ES 供需之量化(Yin et al., 2023)。其中 ES 綜合評估與權衡模型 (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs model, InVEST) 最為廣泛使用，因 InVEST 具綜合性與廣泛性，模型可評估將近 20 項 ES 並將評估結果視覺化，數據需求量少且較易取得(Ding et al., 2021)，因此 InVEST 成為量化各地區 ES 之利器，目前愈來愈多國家及地區使用 InVEST 量化 ES(Ding, Fang, et al., 2023)。

為釐清 ES 與 FEW Nexus 間永續性，Ding, Fang, et al. (2023)建立永續性之評價指標，對中國長江三角地帶城市中 FEW Nexus 之 FEW 子系統進行評比，接著利用 InVEST 模型量化產水量 (Water Yield) 、碳儲存量 (Carbon Storage) 、土壤保持力 (Soil Retention) 與糧食生產 (Food Production) ，評估永續性與多項 ES 間關係。比較永續性與 ES 間之相關性，發現水系統永續性相比於能源或糧食系統，與糧食生產以外之 ES 呈現顯著正相關性，尤其水系統永續性與產水量間存在顯著之正相關，p 值檢定之 p 值皆小於 0.01，顯示高產水量有利於鏈結之永續性，整體而言城市產水量與鏈結永續性呈現協調，且隨時間逐步提升。

另一篇研究關注水相關 ES 之永續發展，為量化水源供給與土壤侵蝕調節等 ES，研究中使用 InVEST 中產水量 (Water Yield) 與沉積物傳遞 (Sediment Delivery Ratio) 之模擬模型，解析水相關 ES 之空間分布，結果發現藉由土地管理措施將有效減少地表徑流，措施包含增加土壤有機質、種植根系較深之作物品種等，此舉將增加水滲透率並提升水相關 ES。此外由於 InVEST 所需資料較簡單，以 InVEST 量化與繪製 ES，可以在資料較缺乏區域評估當地 FEW Nexus，初步對 ES 進行區域規劃與管理(Sahle et al., 2019)。



## 2.3 土地利用與土地覆蓋

土地利用與土地覆蓋 (Land Use Land Cover, LULC) 之變遷反映人類使用資源趨勢，也是引發社會廣泛關注之熱門議題。近年台灣隨工商業蓬勃發展，人類行為對 LULC 改變之影響將日益加劇，2030 年城市土地面積將增加至 120 萬平方公里，2000 年全球城市土地面積約三倍(Seto et al., 2012)，將導致 LULC 從農田、草地或森林大量轉向城市用地，直接影響城市鄉村景觀與區域生態永續性，不合理土地利用會間接造成景觀破碎化，對生態系統產生負面衝擊，進而引發一系列環境問題，如土地退化、水資源短缺、土壤有機碳減少與生物多樣性喪失(Xiao et al., 2022)，因此，評估 LULC 已然成為一項迫切議題(Hou et al., 2020)。

研究中提出多種評估 LULC 變遷之方式，如土地利用動力度 (Land use dynamic degree) 、土地利用轉移矩陣 (Land use transfer matrix) 、生態足跡 (Ecological footprint) 等等，其中又以 ES 受到廣泛研究學者關注(Li et al., 2018)。不同 LULC 會提供不同 ES，因此 LULC 變化對 ES 之影響將是 LULC 規劃之重要考量因素(Xiao et al., 2022)。

千禧年生態系評估報告指出，LULC 為 1950 年代至今 ES 變化最重要之驅動力，此外，全球土地計畫 (Global Land Project, GLP) 、生態系統及生物多樣性經濟學 (Economics of Ecosystems and Biodiversity, TEEB) 與生物多樣性及 ES 之跨政府科學政策平台 (Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services , IPBES) 等一系列國際計畫之實施，也極大地促進 LULC 變化與 ES 研究之整合，全球學者越來越關注 LUCC 對 ES 之影響，並在全球、國家、區域與流域尺度上進行廣泛研究，取得顯著之研究成果(Liu et al., 2020)。

現今具有大量使用 LULC 量化 ES 之研究案例，Li et al. (2018)分析 LULC 變化對中國成都 ES 之影響，由於採用適當之土地管理方式，土地提供之 ES 價值隨時間推移而增加，然而，該分析並未量化對特定 ES 之影響，可能造成某些 ES 被忽略之現象發生。過去多項研究表明，將 LULC 適當管理不僅提供各種 ES，同時可調適



不同 ES 間之權衡關係(Hanes et al., 2018)。Zheng et al. (2016)展現不同 LULC 情境下產水量 (Water Yield) 、水質淨化 (Water Purification) 、碳吸存 (Carbon Sequestration) 、沉積物保持 (Sediment Retention) 與農業生產 (Agricultural Production) 五種 ES 間之權衡，農業生產增加導致水質下降，產生嚴重外部成本，而藉由河岸灘地能有效保留沉積物與淨化水質，同時提供由高蒸散量而得知額外水量，將整體 ES 權衡影響最小化，凸顯 LULC 對 ES 之重要性。

## 2.4 生態系服務熱區

ES 在空間分佈與豐富度上存在異質性，為確定多種 ES 保護之重要區域，過去研究中多使用 ES 熱區之概念進行討論。Schröter and Remme (2016) 提及 ES 熱區劃定主要分為兩種類型，分別是單一 ES 高價值區域與多項 ES 重疊區域。單一 ES 高價值區域劃分方法包含分位數法 (Quantile method) 、閾值法 (Threshold method) 與集群法 (Cluster method) ，分位數法多定義 ES 前 5-30% 之高價值區域為熱區；閾值法則會設定閾值作為判定 ES 是否為熱區之依據；集群法透過如 Jenks natural breaks 之分類方法，接著進行空間自相關統計，並使用統計結果判斷空間集群狀態，以進行後續冷熱區分析。

目前有多種定義 ES 綜合熱區之方法，部分研究將不同 ES 數值疊加，取最高分位數或設定閾值作為熱區，部分則會考量 ES 之豐富度和多樣性，甚至加入權重及指標作為設定標準。描繪多項 ES 熱區透過疊加各 ES 熱區來實現，藉由將 ES 區分為三個等級，接著使用 Natural Breaks 模式進行分類，評估高數值區域之間之重疊，將其定義為 ES 熱區(O'Farrell et al., 2010)；Orsi et al. (2020)則將每項 ES 前 20% 高之區域為該 ES 之熱區，將 8 項 ES 熱區疊加，形成數量由 0 至 8 之間之 ES 綜合熱區地圖。

Moran 's I 指數是常見用於計算空間自相關性之統計指標，各種 ES 熱區文獻中



被廣泛使用。Renard et al. (2015)利用 Moran's I 計算 ES 热區供給，ES 供給 1970 年代主要為農業生產與防洪功能，至 2006 年後逐漸呈現 ES 均勻發展型態，然而 ES 供給總量均勻化，由 Moran's I 指數顯示，提供相同 ES 之區域在空間上變得更加集聚。Moran 's I 指數範圍為 -1 至 1，當 Moran 's I 指數接近 1 時，代表正向空間自相關，相似值分布群聚；反之當 Moran 's I 指數接近 -1 時，則表示存在負向空間自相關，相似值排列分散，若 Moran 's I 指數接近 0 則表示空間上無自相關(Lorilla et al., 2018)。

Lin et al. (2018)將 ES 數值進行標準化，使用 Natural Breaks 法將每項 ES 分級，並使用 k nearest 方法計算 Moran 's I 指數，量化 ES 空間分布情況，接著定義每項 ES 中 Moran 's I 指數最高 20% 區域為熱區，Moran 's I 指數最低之 20% 區域為冷區。另外一篇過去研究將 ES 數值標準化後計算 Moran's I 指數，用於確定每項 ES 之空間集聚狀況，並提取 Moran's I 指數最高及最低之 25% 作為每項 ES 热區與冷區，最後利用空間疊加函數將熱區與冷區重疊，得出綜合 ES 热區與冷區(Dou et al., 2020)。

## 2.5 永續性指標

永續性指標 (Sustainability Indicator) 致力於量化和評估 FEW Nexus 相互作用，主要方法包含系統動力學模型 (System Dynamics Model) 、生命週期評估方法 (Life Cycle Assessment Method) 與資料包絡分析模型 (Data Envelopment Analysis Model) 。系統動力學模型透過建立 FEW Nexus 之因果回饋循環，模擬量化不同情境下之 FEW Nexus 相關性；生命週期評估方法用於分析 FEW Nexus 中直接或間接之資源消耗總量，並評估對環境之潛在影響；資料包絡分析模型則利用多種投入產出指標量化及評估系統，提供資源配置和永續發展之參考依據(Yong Wang et al., 2022)。



儘管擁有支援系統最佳化管理之量化工具，用以評估政策對 FEW Nexus 之影響，然而在 FEW Nexus 資源現況、鏈結關係呈現較為受限，因而使用複雜度低且具代表性之永續性指標，可對 FEW Nexus 進行初步評估，成為後續整合資源管理模型之橋樑。永續性指標被視為簡單而有價值之評估工具，如永續發展指數 (CSI)、地球生命力指數 (LPI)、都市發展指數 (CDI)、人類發展指數 (HDI) 等等，然而現有永續性指標主要適用於國家尺度，研究尚未充分涵蓋區域尺度，缺乏將永續性指標應用於區域尺度的研究 (Yi et al., 2020)。Putra et al. (2020) 選擇南亞地區 FEW Nexus 之指標，過程參考永續發展目標中涉及 FEW Nexus 安全之相關目標，初步囊括 72 項指標，包括 FEW Nexus 之安全、社會和人口特徵，在考慮相似性及數據可用性後，最終選擇 36 項指標，FEW 子系統各 12 項指標，進行南亞地區 FEW Nexus 研究。

Chaudhary et al. (2018) 提出研究糧食子系統之綜合框架，透過七項永續營養安全指標定量描述糧食子系統，指標透過全球研究機構眾多之營養、經濟、糧食系統與氣候變遷專家共同研議而出；歐盟委員會根據國際再生能源機構 (International Renewable Energy Agency, IRENA) 確立 28 項農業環境指標，並被歸類到土壤、水、空氣、生物多樣性、農場管理和農業投入六項領域中，用以評估農業與環境之間之關係 (Kasztelan & Nowak, 2021)。

能源子系統永續性著重能源安全、能源效率、能源潔淨度與低碳排放四部分，安全性是確保能源供應穩定，實現多元穩定之供應和消耗；效率包括經濟和物理效率，目標為在最大限度提高能源利用效率，藉此降低損失；能源潔淨度涉及污染能源之整個生命週期，目標以天然氣與再生能源替代煤炭；低碳排放目標則是最大限度減少能源系統之碳排放，減少化石能源使用，增加再生能源比例 (Hou et al., 2021)。

水子系統之永續發展由計算水環境容量進行分析，過去文獻計算主要集中水資源此單一指標，在分析上僅依靠單一要素對水環境進行評估，往往忽略水子系統在空間分佈上之特點，若從水資源量與水消耗量等不同方向進行評估，可完整揭示永續發展上之空間差異 (Jia et al., 2018)。



## 第三章 、研究方法與步驟

### 3.1 研究區簡介

桃園市位於台灣西北部，因緊鄰台北、新北都會區，工商產業與人口持續成長，目前桃園有 32 處工業區，工業產值占全國 19% 位居台灣首位，顯示桃園已然成為重要之製造研發城市，因此於 2014 年底升格為直轄市，為台灣六個直轄市之一。桃園機場捷運、桃園國際機場園區等大型公共建設之進行，吸引眾多人力移入，根據內政部戶政司資料顯示，桃園市自 2015 年成為人口增長最多之縣市，目前居住人口已超過 230 萬人，以桃園區及中壢區為雙核心發展。

桃園市為台灣目前快速都市化之區域，其境內之傳統農業景觀如稻田與埤塘，伴隨產業轉型之建設過程逐漸消失。根據桃園市歷年統計年報，桃園農田用地自 2007 年之 49079 之公頃，到 2020 年時僅剩 34015 公頃；由桃園市政府都市發展局之進行埤塘實地調查，目前桃園臺地埤塘數量為 3097 口，相比巔峰期埤塘曾達 8,846 口降低不少，埤塘減少起因於桃園大圳與石門大圳之興建，降低台地蓄水灌溉的需求，同時都會區及工商業發展，使大量埤塘被填平以滿足工商業土地需求。

桃園市地形以東南部復興區地勢最高，海拔由東南向西北方向遞減，中央有連綿不斷之台地，由新北市林口區一直延伸到新竹縣湖口鄉，過去二十年中桃園市 LULC 大量由農業轉向工商業使用，對區域生態有極大影響。目前桃園市主要都市區集中於龜山、桃園、中壢及內壢；農業區則是位於觀音、新屋與楊梅之農業用地；埤塘除分散在農業用地中，也散落於觀音、大園與中壢之工業用地邊緣地帶。

桃園市在 FEW Nexus 表現不佳，過去研究評估 2006 年至 2011 年台灣各城市投入產出效率，桃園市為全台綜合效率最低之城市，平均得分僅 0.556，遠低台灣整體之平均得分，投入產出效率之標準差同樣敬陪末座，顯示桃園在城市永續性持續表現不佳，過去研究進一步討論桃園市該如何提升永續性，在水子系統方面須減少 SOx 80% 與 59% 廢水排放，能源子系統則要降低 64% 電力消耗、33% 汽油消耗與 12% 水消耗(Yang et al., 2016)。

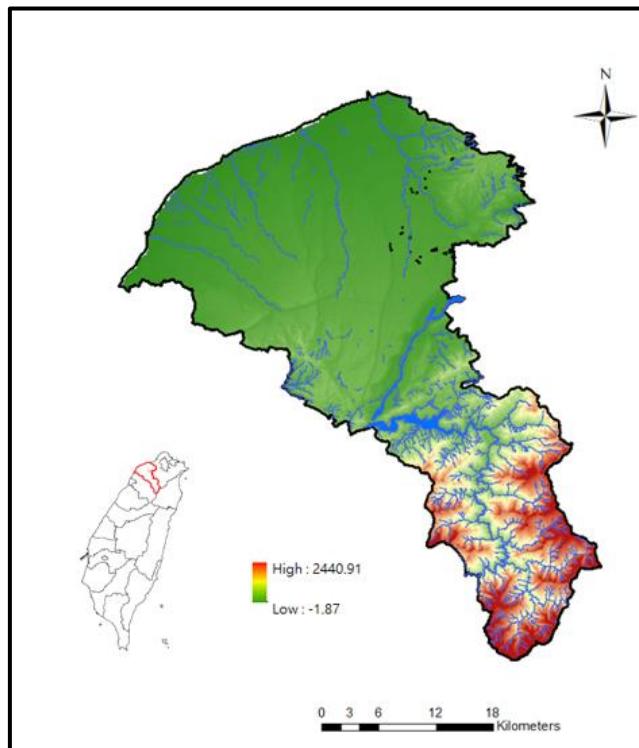


圖 2、桃園市地勢與研究區範圍

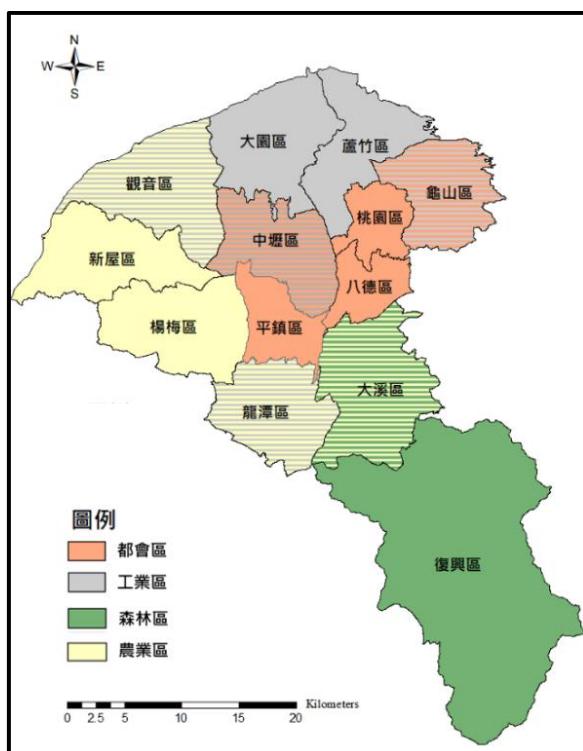


圖 3、桃園市行政分區與區域發展



表 1、LULC 分類代碼對照表

LULC 分類	2007 年及 2014 年之代碼及類別	2021 年之代碼及類別
農地	01 農業使用土地	01 農業使用土地
林地	02 森林使用土地	02 森林使用土地
草地	0903 草生地	0702 公園綠地廣場 0902 草生地
建地	03 交通使用土地 0406 防汛道路 05 建築使用土地 06 公共設施使用土地 0701 文化設施 0702 休閒設施 0901 軍事用地	03 交通使用土地 0405 防汛道路 05 建築使用土地 06 公共設施使用土地 0701 文化設施 0703 休閒設施
水體	0401 河川 040301 水庫 0404 水道沙洲灘地 0405 水利構造物 0407 海面	0401 河川 040201 水庫 0403 水道沙洲灘地 0404 水利構造物 0406 海面
埤塘	040302 湖泊 040303 其他蓄水池	040202 湖泊 040203 蓄水池
荒地	08 礦鹽使用土地 0902 濕地 0904 裸露地 0905 灌木荒地 0907 營建剩餘土石方 0908 空置地	08 礦鹽利用土地 0901 濕地 0903 裸露地 0904 營建剩餘土石收容 處理相關設施 0905 空置地

本研究為探究 LULC 變遷對 FEW 永續性之影響，同時了解 ES 熱區內外 FEW 永續性之差別，因而選擇永續性效率較低之桃園市作為目標區域。

LULC 數據由國家土地測繪中心於 2007、2014 與 2021 年收集，本研究將 LULC 類別重新劃分為七類，分別是農地、林地、草地、建地、水域、埤塘與荒地，並製作成 100 m × 100m 之網格資料進行分析。LULC 類型分類參考自林裕彬 (2021) 之分類，由於桃園市埤塘為重要地景，本研究將埤塘從水體區分出來，另外設定為獨立之 LULC，詳細內容如表 1 所示，LULC 分類後地圖分別如圖 4、圖 5 及圖 6 所示。

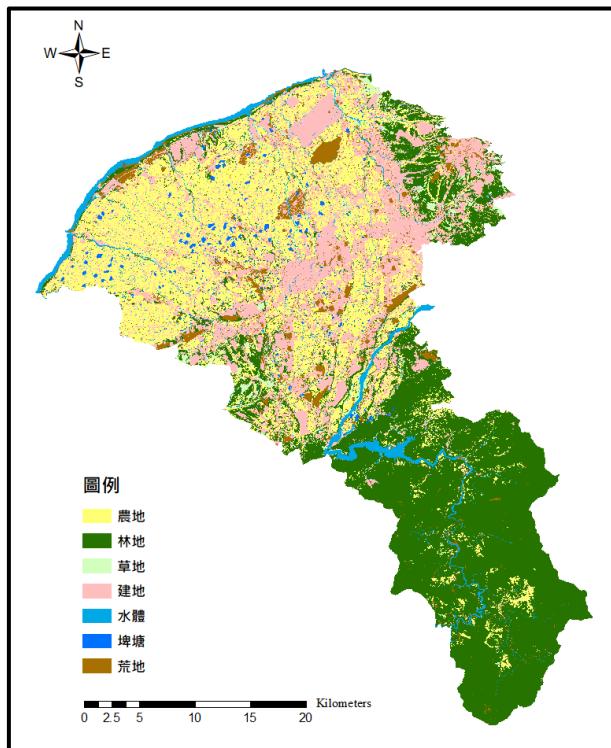


圖 4、桃園市 2007 年全區 LULC 分布情形

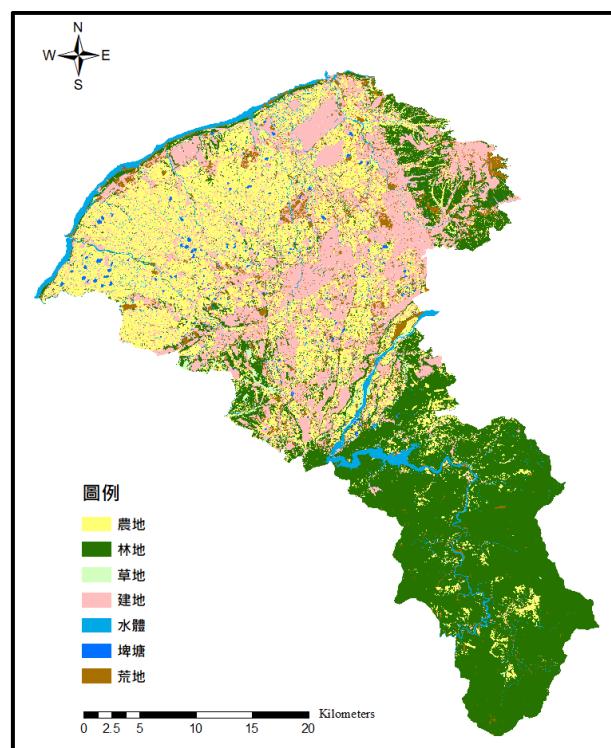


圖 5、桃園市 2014 年全區 LULC 分布情形

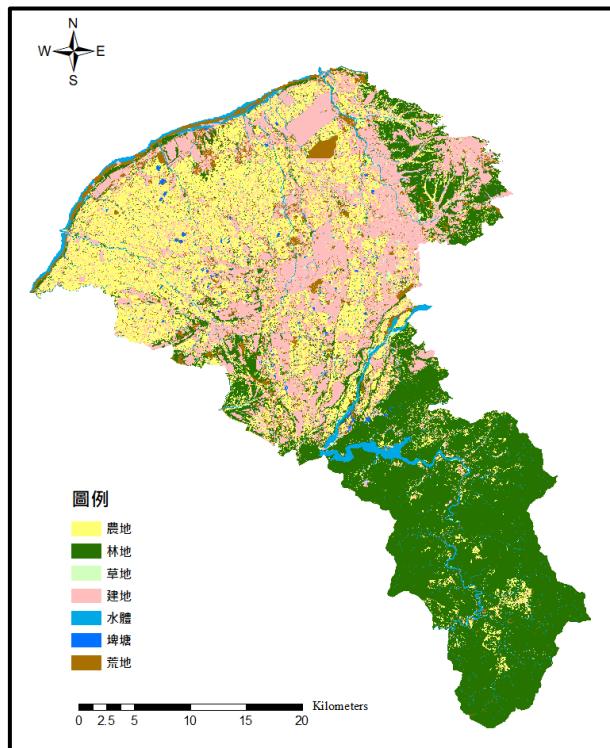


圖 6、桃園市 2021 年全區 LULC 分布情形

桃園市 2021 年 LULC 類型面積及百分比整理如表 2 所示，桃園市 2007 年、2014 年、2021 年各類 LULC 類型所占比例如圖 7 所示，綜合觀察桃園市歷年 LULC 面積比例，發現其中林地位居首位，其次則為農地與建地；而觀察 2007 年至 2021 年之 LULC 變化趨勢，農地與埤塘所占比例由 2007 年持續減少，另一方面建地與荒地佔整體 LULC 比例則持續上升。

表 2、桃園市 2021 年之 LULC 面積及百分比

土地利用	面積(km <sup>2</sup> )	百分比
農地	307.73	25%
林地	451.16	37%
草地	12.63	1%
建地	320.19	26%
水體	45.29	4%
埤塘	8.87	1%
荒地	71.36	6%
總計	1217.22	100%

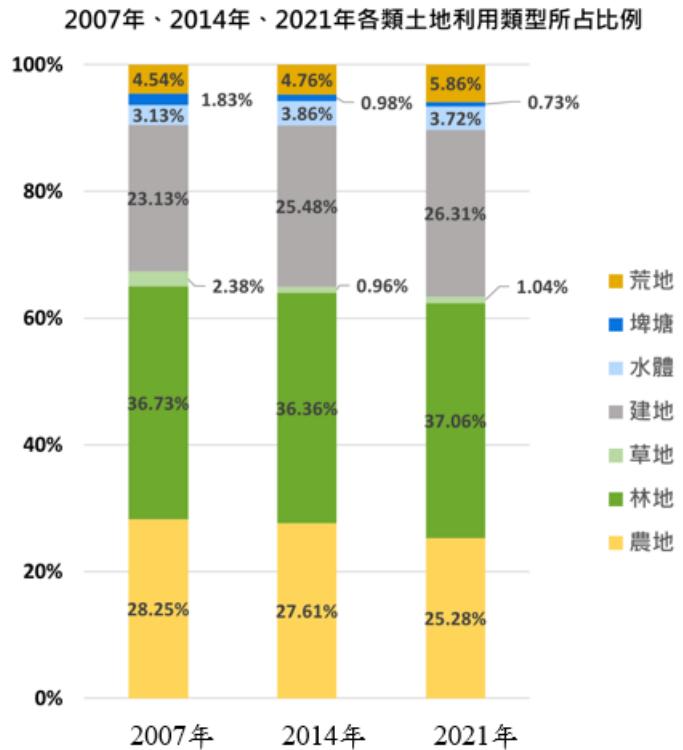


圖 7、桃園市 2007 年、2014 年、2021 年各類 LULC 類型所佔比例



### 3.2 生態系服務量化

本研究採用史丹佛大學 Natural Capital Project 開發之 ES 綜合評估與權衡模型 (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs model, InVEST) 進行量化 ES 之研究。InVEST 基於生產函數定義生態系功能與價值變化之模組進行，不同模組計算用於不同種類 ES，並結合 LULC 資料作為 ES 分布計算之基礎。

InVEST 可評估將近 20 項 ES，並能將 ES 評估結果視覺化，在各國和地區廣泛應用(Fang et al., 2021)；InVEST 所需資料需求量少且較易取得，同時能藉由氣候因子衡量人類活動對 ES 之影響，因而本研究選擇 InVEST 對桃園市 FEWES 進行評估 (Ding et al., 2021)。為充分討論 FEW Nexus 之永續性，本研究在 FEW 子系統中各選擇兩項 ES 進行討論，分別為糧食生產 (Food Production)、沉積物保留 (Sediment Retention)、碳儲存 (Carbon Storage)、都市降溫 (Urban Cooling)、產水量 (Water Yield) 與營養鹽保留 (Nutrient Retention) 將這六項 ES 進行 FEW Nexus 分析。

表 3、InVEST 模式對應 FEW Nexus

生態系服務	InVEST 模式	FEW 分類	參考文獻
糧食生產 Food production	糧食生產 Crop production	糧食	(Yin et al., 2023) (Yuan & Lo, 2020)
沉積物保留 Sediment Retention	沉積物遞移 Sediment Delivery Ratio	糧食	(Yuan & Lo, 2020) (Karabulut et al., 2018)
碳儲存 Carbon Storage	碳儲存與碳吸存 Carbon Storage and Sequestration	能源	(Yin et al., 2023) (Yuan & Lo, 2020)
都市降溫 Urban Cooling	都市降溫 Urban Cooling	能源	(Holland et al., 2018) (Picchi et al., 2019)
產水量 Water Yield	年產水量 Annual Water Yield	水	(Yin et al., 2023) (Sahle et al., 2019)
營養鹽保留 Nutrient Retention	營養鹽遞移 Nutrient Delivery Ratio	水	(Sahle et al., 2019) (Karabulut et al., 2016)



此六項 ES 分別對應到六種不同 InVEST 模式，詳細對應及對應子系統如表 3 所示。InVEST 模式中糧食生產（Crop Production）計算評估研究區域之不同種類之糧食產量；碳儲存與碳吸存（Carbon Storage and Sequestration）模型計算土地地上與地下之固碳量，以評估不同土地利用之碳儲存能力；都市降溫（Urban Cooling）模型計算在都市熱島下之植被、綠蔭之降溫調適；沉積物遞移（Sediment Delivery Ratio）與營養鹽遞移（Nutrient Delivery Ratio）模型分別計算沉積物與營養物質在土壤之保留能力，用以評估逕流水質；年產水量（Annual Water Yield）則透過年降雨量、土壤特性、作物特性等因子，評估研究區域之年產水量。

### 3.2.1 糧食生產

糧食生產（Crop Production）模組會根據 LULC 資訊，估算特定作物糧食產量與營養價值，其中又分為百分位數（Percentile）與迴歸（Regression）兩種模型，百分位數模型根據國際農糧組織資料庫估算出第 25、50、75 與 95 百分位數之作物產量，迴歸模型則是提供固定化肥下之產量預估值。

本研究選擇桃園市最主要糧食作物 - 稻米與甘藷作為目標作物，選擇百分位數模型作為糧食生產模型，並基於全球觀測產量及氣候資料集得出百分位數產量，同時本研究也將模擬產量與桃園市實際糧食產量進行驗證，選取與實際糧食產量最相近百分位數情境。

### 3.2.2 沉積物保留

InVEST 中之沉積物遞移（Sediment Delivery Ratio, SDR）模式用以量化沉積物保留量，模擬陸地沉積物生成與輸送至河流之分布，模式使用土壤流失公式 USLE (Wischmeier & Smith, 1978) 進行計算，結合地形、氣候與 LULC 得出土壤侵蝕下沉積物保留能力。式(1) 與式(2) 中  $RKLS_g^t$  代表完全無植被下之最大侵蝕量，由  $R_g^t$ 、 $SE_g^t$ 、 $LS_g^t$  三項參數相乘， $USLE_g^t$  則呈現植被覆蓋下之最大侵蝕量，因此將覆



蓋管理因子  $C_g^t$  與水土保持因子  $P_g^t$  列入考慮，由五項參數相乘而得。

$$RKLS_g^t = R_g^t \times SE_g^t \times LS_g^t \quad (1)$$

$$USLE_g^t = R_g^t \times SE_g^t \times LS_g^t \times C_g^t \times P_g^t \quad (2)$$

$R_g^t$  代表  $t$  年網格  $g$  之平均降雨沖蝕力 (Rainfall Erosivity) ( $\frac{MJ \cdot mm}{ha \cdot hr}$ )；

$SE_g^t$  代表  $t$  年網格  $g$  之土壤可蝕性 (Soil Erodibility) ( $\frac{ton \cdot ha \cdot hr}{MJ \cdot ha \cdot mm}$ )；

$LS_g^t$  代表  $t$  年網格  $g$  之坡長與梯度因子 (Slope Length - Gradient Factor)；

$C_g^t$  代表  $t$  年網格  $g$  之覆蓋管理因子 (Cover-Management Factor)；

$P_g^t$  代表  $t$  年網格  $g$  之水土保持處理因子 (Support Practice Factor)。

沉積物保留量 (Avoid Export,  $AEX_g^t$ ) 由式(3) 得出，顯示因植被覆蓋減少之最大侵蝕量，以及捕獲自上游輸送之沉積物，當沉積物保留量愈高，代表沉積物傳輸相關之 ES 價值愈高。式(4) 中之 SDR 代表流經網格之沉積物比例，而  $SDR_{max}$  代表 SDR 理論最大值，依據 Vigiak et al. (2012) 研究將  $SDR_{max}$  數值設為 0.8，其餘參數  $k$  值與  $IC_0$  則分別設定為 2 及 0.5。

$$AEX_g^t = (RKLS_g^t - USLE_g^t) \times SDR_g^t \quad (3)$$

$$SDR_g = \frac{SDR_{max}}{1 + exp\left(\frac{IC_0 - IC_g}{k}\right)} \quad (4)$$

連通性指數 (Connectivity Index, IC) 描述沉積物從源頭至匯流處之水文連結，當沉積物源頭到匯流處間地形陡峭、距離短或植被稀疏時，大量沉積物將有效輸送到下游匯流處，因而出現高連通性指數。計算 IC 為  $D_{up}$  與  $D_{dn}$  之比值，分別由式



(6) 與式(7) 計算得出， $D_{up}$ 代表網格向上至源頭之區域，並由平均覆蓋管理因子 $\bar{C}$ 、平均坡度 $\bar{S}$  及集水區面積 $A$  計算而成； $D_{dn}$ 則代表與溪流之最短距離，其中 $d_g$ 是坡度最陡處與溪流之最短距離， $C_g$ 與  $S_g$ 則分別代表在網格  $g$  之覆蓋管理因子與坡度。模式參數來自蕭戎雯 (2013)之研究，詳細內容如表 4 所示。

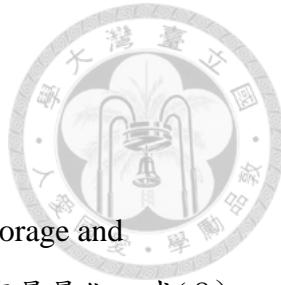
$$IC = \log_{10} \left( \frac{D_{up}}{D_{dn}} \right) \quad (5)$$

$$D_{up} = \bar{C} \times \bar{S} \times \sqrt{A} \quad (6)$$

$$D_{dn} = \sum_g \frac{d_g}{C_g S_g} \quad (7)$$

表 4、各土地利用類型之沉積物保留參數表

土地類型	覆蓋與管理因子 C	水土保持處理因子 P
農地	0.1	1
林地	0.01	1
草地	0.01	1
建地	0.01	1
水體	0	1
埤塘	0	1
荒地	1	1



### 3.2.3 碳儲存

不同 LULC 碳儲存密度存在差異，碳儲存與吸存（Carbon Storage and Sequestration）模式可依據 LULC 與碳庫參數，將各 LULC 碳儲存量量化。式(8)說明碳儲存之組成，碳儲存主要由四個碳庫決定，分別為地上生物質 C\_above (Aboveground biomass) 、地下生物質 C\_below (Belowground biomass) 、土壤有機質 C\_soil (Soil organic matter) 與死亡有機質 C\_dead (Dead organic matter) ，將四種碳庫加總即為 LULC 之碳儲存量。

地上生物質由生長於土壤上之植物有機質組成，如樹枝、樹葉等；地下生物質包括地上生物量之所有根系；土壤有機質代表土壤內之有機成分，為目前最大之陸地碳庫；死亡有機質則包含各種死亡植物遺留之遺骸，如枯枝落葉、漂流木等。

各 LULC 包含至少一種碳庫，本研究使用農業試驗提供之桃園市有機碳分布圖，計算各 LULC 每公頃平均碳總量，並依據 IPCC 發表 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories 中提供之 LULC 碳庫("Eggleston et al., 2006)，依照比例分類計算得出表 5。

$$CS_{gi}^t = C_{above}^t_{gi} + C_{below}^t_{gi} + C_{soil}^t_{gi} + C_{dead}^t_{gi} \quad (8)$$

$$TCS_{gi}^t = \sum_{g=1}^{j\_total\_t} CS_{gi}^t \quad (9)$$

表 5、各 LULC 之碳庫儲存量（單位：Mg/ha）

土地類型	地上生物質 (C_above)	地下生物質 (C_below)	土壤有機質 (C_soil)	死亡有機質 (C_dead)
農地	34.3	6.9	76.7	4.6
林地	80.2	19.2	27.7	1.6
草地	2.7	10.7	99.3	5.9
建地	0.0	0.0	0.0	0.0
水體	0.0	0.0	0.0	0.0
埤塘	0.0	0.0	0.0	0.0
荒地	0.0	0.0	0.0	0.0



### 3.2.4 都市降溫

都市降溫模式參考 Zardo et al. (2017)與 McDonald et al. (2016)之研究，將熱調適指數 (Heat mitigation Index,  $HM_i$ ) 作為量化降溫服務之分布。

面積大於兩公頃綠地會對周圍環境產生額外降溫效果，模式定義未受大面積綠地空間 (Area of Green Space,  $GA_i$ ) 影響之區域， $HM_i$  將與一般降溫指數 ( $CC_i$ ) 相同；若受到  $GA_i$  降溫效果影響，則以綠地降溫指數 ( $CC_{park_i}$ ) 作為該網格之  $HM_i$ 。計算  $GA_i$  時需先搜索綠地影響範圍 (Green Area Maximum Cooling Distance,  $d_{cool}$ ) 內之綠地面積，LULC 若為植被則視為可提供降溫服務，將參數  $g_i$  設定為 1，反之則設定為 0，接著將範圍內植被面積加總即為  $GA_i$ 。 $CC_{park_i}$  代表周圍綠地對之降溫效果，與  $CC_i$  相比增加綠地距離之加權平均，用以彰顯各綠地降溫效果。

$$HM_i = \begin{cases} CC_i & \text{if } CC_i \geq CC_{park_i} \text{ or } GA_i < 2ha \\ CC_{park_i} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

$$GA_i = cell_{area} \times \sum_{j \in d \text{ radius from } i} g_j \quad (11)$$

$$CC_{park_i} = \sum_{j \in d \text{ radius from } i} g_j \times CC_i \times e^{\left(\frac{-d(i,j)}{d_{cool}}\right)} \quad (12)$$

$CC_i$  計算原理參考 Zardo et al. (2017) 與 Kunapo et al. (2018) 研究，由三項環境因子組成，包含陰影 (Shade)、反照率 (Albedo) 與蒸發散指標 (ETI)，陰影表示樹冠覆蓋比例，反照率為地表反射之太陽輻射比例，ETI 為潛在蒸散量標準化之數值，各 LULC 中三項環境因子如表 6 所示，環境因子間權重依汪中安 (2022) 研究設定，權重分別為 0.754、0.099 與 0.147，計算如式 (13) 所示。

$$CC_i = 0.754 \times Shade + 0.099 \times Albedo + 0.147 \times ETI \quad (13)$$



ETI 計算式中如式(14)所呈現，作物蒸散係數 ( $K_c$ ) 資料來源取自 FAO，環境參考蒸發散 ( $ET_0$ ) 由 Modified Hargreaves 公式計算(Droogers & Allen, 2002)，研究區內  $ET_0$  最大值即為  $ET_{max}$ ，式(15) 呈現 Modified Hargreaves 公式， $T_{av}$  代表每月平均每日最高溫度與平均每日最低溫度之平均值； $TD$  為每月平均每日最大值與平均每日最小值之差值； $RA$  由 Allen et al. (1998) 提供， $P$  則為每月平均降雨量。

$$ETI = \frac{K_c \times ET_0}{ET_{max}} \quad (14)$$

$$ET_0 = 0.0013 \times 0.408 \times RA \times (T_{av} + 17) \times (TD - 0.0123P)^{0.76} \quad (15)$$

表 6、各 LULC 環境因子參數表

土地類型	陰影 Shade	反照率 Albedo	作物係數 $K_c$
農地	0	0.2	0.7
林地	0.8	0.15	1
草地	0.1	0.26	1
建地	0.3	0.23	0.55
水體	0	0.1	1
埤塘	0	0.1	1
荒地	0.1	0.3	0.001

### 3.2.5 營養鹽遞移

營養鹽遞移 (Nutrient Delivery Ratio, NDR) 模式用於計算營養鹽保留量、營養鹽來源及輸送，具評估自然植被保留營養鹽之 ES 效益。營養鹽傳輸分為兩階段，第一階段營養鹽透過地表流與地下流輸送，並於抵達溪流停止；第二階段是營養鹽在溪流中之傳輸，模式依據坡度、LULC 保留效率等環境因子，計算溪流內之輸送



因子，最終於流域出口計算流域之營養鹽總輸出量。

### 營養鹽負荷

營養鹽負荷 (Nutrient Load,  $load_{x_g}$ ) 代表由各地匯流至網格  $g$  之營養鹽來源，各 LULC 营養鹽負荷多用經驗公式進行計算。為呈現各 LULC 內不同網格之  $load_{x_g}$  差異，模式將  $load_{x_g}$  與逕流勢能指標 (Runoff Potential Index,  $RPI_g$ ) 相乘，得出式(16) 中之修正營養鹽負荷 ( $modified\_load_{x_g}$ )。

$$modified\_load_{x_g} = load_{x_g} \times RPI_{x_g} \quad (16)$$

修正營養鹽負荷可分為顆粒型營養鹽與溶解型營養鹽，顆粒型營養鹽 ( $load_{surf,g}$ ) 藉由地表逕流傳輸，溶解型營養鹽 ( $load_{subsurf,g}$ ) 則多經由地下逕流，分別如式(17) (18) 所示。 $proportion\_subsurface_g$  為地下逕流比例，數字為 0 代表皆為地表逕流，1 則代表皆為地下逕流，氮、磷營養鹽之計算原理相同，差別在於含磷營養鹽通常為顆粒狀，因此設定  $proportion\_subsurface_g$  為 0。

$$load_{surf,g} = (1 - proportion\_subsurface_g) \times modified\_load_{n_g} \quad (17)$$

$$load_{subsurf,g} = proportion\_subsurface_g \times modified\_load_{n_g} \quad (18)$$

### 營養鹽傳輸

營養鹽匯流至單一網格後，接著由各網格向外輸送，最終抵達河流。營養鹽傳輸設定營養鹽輸出值，並加以計算地表逕流與地下逕流輸送比率，其中地表營養鹽傳輸與 SDR 模型原理基本相同，僅減少平均覆蓋管理因子  $\bar{C}$ 。將 IC 帶入式(22)得出  $NDR_{surf,g}$ ， $IC_0$  與  $k$  為校準參數， $IC_0$  被定義為  $\frac{IC_{max} - IC_{min}}{2}$ ； $NDR_{0,g}$  由最大保留比例 (Maximum Retention Efficiency,  $eff'_g$ ) 計算而成，用以表示下游未能將營養鹽保留之比例。



(19)

$$IC = \log_{10} \left( \frac{D_{up}}{D_{dn}} \right)$$

$$D_{up} = \bar{S} \times \sqrt{A} \quad (20)$$

$$D_{dn} = \sum_g \frac{d_g}{S_g} \quad (21)$$

$$NDR_{surf,g} = \frac{NDR_{0,g}}{1 + \exp \left( \frac{IC_0 - IC_g}{c} \right)} \quad (22)$$

$$NDR_{0,g} = 1 - eff_g' \quad (23)$$

地下營養鹽傳輸與河流距離間呈現指數衰減，並在達到最大地下營養鹽保留值時趨於平穩， $eff_{subs}$ 是透過地下流動可以達到之最大營養鹽保留效率，地下水保留長度 ( $l_{subs}$ ) 代表土壤最大容量可保留營養鹽之距離， $l_g$  則是網格距離河流之距離，計算式如式(24)所示。

$$NDR_{subs,g} = 1 - eff_{subs} \times \left( 1 - e^{\left( \frac{-5l_g}{l_{subs}} \right)} \right) \quad (24)$$

營養鹽輸出為營養鹽負荷與 NDR 乘積，進而將流域內所有網格進行加總，即可得出總營養鹽保留量  $x_{exp}$ ，NDR 模式參數來自蕭戎雯 (2013) 之研究，計算所需之參數如表 7 所示。

$$x_{exp_i} = load_{surf,g} \times NDR_{surf,g} + load_{subs,g} \times NDR_{subs,g} \quad (25)$$

$$x_{exp} = \sum_g x_{exp_g} \quad (26)$$



表 7、各 LULC 之營養鹽保留參數表

土地類型	氮營養鹽			磷營養鹽	
	排放量 <i>load</i> (kg/ha-year)	保留比例 <i>eff</i>	最大地下逕 流比	排放量 <i>load</i> (kg/ha-year)	保留比例 <i>eff</i>
農地	16	0.05	0.3	0.5	0.05
林地	1.6	0.8	0	0.25	0.8
草地	1	0.5	0	0.1	0.5
建地	3.5	0	0	0.5	0
水體	3.5	0	0	0.5	0
埤塘	3.5	0	0	0.5	0
荒地	3.5	0.1	0	0.5	0.1

### 3.2.6 產水量

產水量模組用以估算 LULC 對地表水產量影響，年產水量 ( $WY_g^t$ ) 代表  $t$  年網格  $g$  之年產水量，由全年實際蒸散量 ( $AET_g^t$ ) 與全年降雨量 ( $P_g^t$ ) 計算得出，詳細由式(27) 所列。

$$WY_g^t = \left(1 - \frac{AET_g^t}{P_g^t}\right) \times P_g^t \quad (27)$$

LULC 為植被與非植被時，將以不同方法計算  $WY_g^t$ ，當 LULC 為植被時，由於植被高蒸散量之特性，因此使用式(28) 計算  $\frac{AET_g^t}{P_g^t}$ ，代表蒸散量佔總體水循環比例，其餘相關參數則由式(29) 至(31) 計算得出。潛在蒸散量 ( $PET_g^t$ ) 為參考植被蒸散量 ( $ET_{0g}^t$ ) 與蒸散量係數 ( $K_g^t$ ) 之乘積， $ET_{0g}^t$  為參考蒸散量，用以反映當地氣候條件， $K_g^t$  則為植被蒸散係數，依據 LULC 植被調整各網格之蒸發散量。

式(30) 中  $\omega_g^t$  代表氣候土壤特性之參數，其中由季節性因素 (Z) 、植物有效



水含量 ( $AWC_g^t$ ) 與  $P_g^t$  組成。Z 反映當地降水與水文地質特性，依據經驗公式將其設定為 0.2 倍植物可利用含水量 ( $PAWC_g^t$ )； $AWC_g^t$  則是取土壤根限制層深度 ( $Rest\_layer\_depth_g^t$ ) 與植物根深度 ( $Root\_depth_g^t$ ) 較低值，再與  $PAWC_g^t$  之乘積，用以描述土壤容納及釋放供植物使用之水量。

$$\frac{AET_g^t}{P_g^t} = 1 + \frac{PET_g^t}{P_g^t} - \left[ 1 + \left( \frac{PET_g^t}{P_g^t} \right)^{\omega_g^t} \right]^{\frac{1}{\omega_g^t}} \quad (28)$$

$$PET_g^t = K_g^t \times ET_{0g}^t \quad (29)$$

$$\omega_g^t = Z \times \frac{AWC_g^t}{P_g^t} + 1.25 \quad (30)$$

$$AWC_g^t = \min(Rest\_layer\_depth_g^t, Root\_depth_g^t) \times PAWC_g^t \quad (31)$$

當 LULC 並非植被時，則以式(32) 計算全年實際蒸散量，公式參考蒸散量  $ET_g^t$  與植被蒸散量係數  $K_{gl}^t$  計算，並取乘積與  $P_g^t$  取較低值作為  $AET_g^t$ 。

$$AET_g^t = \min(K_{gl}^t \times ET_g^t, P_g^t) \quad (32)$$

### 3.2.7 區域空間自相關

空間自相關分析可識別研究區內熱區分佈，且空間相依性的強度及顯著性容易地被驗證比較(葉春國 et al., 2013)。空間自相關可以區分成二種類型，包括全域空間自相關 (Global spatial autocorrelation) 與區域空間自相關 (Local spatial



autocorrelation)，全域空間自相關可衡量區域內空間自相關的程度，但僅限於整體區域，無法得知不同區域之相關性關係，因而選取熱區時常採用區域空間自相關。

Getis-Ord Gi\*與 Local Moran's I 皆為常用之區域空間自相關分析方法，Getis-Ord Gi\*用於辨識高值或低值聚集區域，適用於全區域空間分析，當相鄰值總合較全域平均值較高時，G 值為正值，若相鄰值總合小於全域平均值，G\*值則可能呈現負值，Getis-Ord Gi\*可用於評估熱區和冷區的顯著性，卻容易忽略集聚和離群值，對區域性集聚的識別能力有限。

Local Moran's I 為衡量目標值與相鄰值間相似程度的指標，適用於不同尺度之分析，同時呈現詳細的地理特徵，識別空間中之離群值，提供更加詳細熱區分布。Moran's I 系數一般介於-1 與 1 間，正值代表具有正向自相關，負值代表具有負向自相關，等於零表示不相關(Legendre & Fortin, 1989)。當目標值與相鄰值相似，Local Moran's I 會呈現正相關；反之兩方數值不相近，Local Moran's I 則呈現負值(Bahri et al., 2014; Premo, 2004)。

過去研究在各種網格大小下，Getis-Ord Gi 探測到之空間熱區面積皆大於 Local Moran's I，顯示 Local Moran's I 方法更能探測熱區的核心區域，是優於 Getis-Ord Gi\*的空間自相關分析方法，有助於決策者判定需要優先治理的區域。本研究中著重區域性之空間模式分析，且過去研究認為 Local Moran's I 優於 Getis-Ord Gi\*，因而選擇 Local Moran's I 作為熱區分析工具(葉春國 et al., 2013)。

Local Moran's I 計算方法參考自 ARCGIS 軟體之說明書，以本研究關注 ES 热區為例，式(33) 中  $I_g$  代表網格  $g$  之 Local Moran's I 數值， $x_g$  是網格  $g$  之 ES 數值， $\bar{X}$  為網格  $g$  鄰近網格之 ES 平均值， $\omega_{gj}$  則是網格  $g$  與其他網格  $j$  間之空間權重，而  $S_g^2$  由式(34) 得出， $n$  為鄰近網格之數量，一併帶入式(33) 計算出 Local Moran's I。(ARCGIS\_PRO3.2\_handbook)。

$$I_g = \frac{x_g - \bar{X}}{S_g^2} \sum_{j=1, j \neq g}^n \omega_{gj} (x_j - \bar{X}) \quad (33)$$



$$S_g^2 = \frac{\sum_{j=1, j \neq g}^n (x_j - \bar{X})^2}{n - 1}$$

經由 ARCGIS 的模型計算，計算得出集群與離群型態（Cluster / Outlier type, COType），即為具有統計顯著性之 Local Moran's I 群集分類，結果分為四大類，分別是高值集群（HH）、低值集群（LL）、高值主要被低值包圍之離群值（HL）與低值主要被高值包圍之離群值（LH）。

Hou et al. (2018)將每項 ES 數值進行 Local Moran's I 計算，並選取集群與離群型態中為 HH 之區域作為該 ES 熱區，熱區網格數值設為 1，其餘網格則設為 0。本研究並無針對特定利害關係人利益，因此賦予六種 ES 相同權重，將六種 ES 進行疊加，產生網格數值為 0 至 6 之地圖，顯示桃園市 ES 種類數量分布，最後選取具四項 ES 以上之區域作為 ES 綜合熱區。



### 3.3 糧食、能源與水系統永續性

FEW Nexus 將 FEW 三項子系統彼此串聯，區域評估永續性有助於實現區域永續發展。建立評估指標體系應遵循系統思維、層次結構和數據可用性三個原則 Qian and Liang (2021)。建立 FEW Nexus 永續性系統，指標分為正負指標，正指標 (+) 數值越大越好，而負指標 (-) 表示數值越小越好。

本研究選擇五項永續性指標分別評估 FEW 永續性，建構完善之評估指標體系，有助於理解資源之間複雜之關係，促進資源供需之間之平衡，確定區域永續發展所需之資源支援。FEW Nexus 不僅涉及 FEW 三項子系統之交互作用，同時涉及經濟、社會與自然因子，因而建構包含資產投資、國內生產毛額 (Gross Domestic Product, GDP) 、人口和溫室氣體排放各因子之指標體系，將更有利於全面、準確地分析 FEW Nexus。

#### 3.3.1 糧食子系統

##### a. 人均種植面積 Per Capita Grain - Sown Area :

人均種植面積是短期耕作地面積與行政區人口之比值，本研究之糧食作物為稻米與甘藷，因此將短期耕作地面積定義為稻米與甘藷之種植面積。

##### b. 糧食種植面積比例 Proportion of Grain - Sown Area :

糧食種植面積是短期耕作地面積除以行政區面積而得。

##### c. 人均糧食生產量 Per Capita Food Production :

糧食生產量由水稻與甘藷生產量加總而成，再將各行政區之糧食產量除以各行政區人口即為人均糧食生產量。

##### d. 單位面積糧食生產量 Food Production Per Unit Area :

單位面積糧食生產量為糧食生產量及短期耕地面積之比值



e. 化肥負荷量 Fertilizer Load :

本研究依據桃園區農業改良場之單位農地建議施肥量，將其假設為單位農地之實際施肥量，接著與農地佔行政區面積之比例相乘，得出行政區化肥負荷量。

### 3.3.2 能源子系統

a. 人均能源消耗 Per Capita Energy Consumption :

本研究假設能源消費量與用電量呈正比，經濟部能源署提供全國人均能源消費量資料，本研究將其依各行政區之佔全國用電比例計算，得出各行政區能源消費量，最後將行政區能源消費量除以行政區人口，即得人均能源消耗量。

b. 能源密集度 Energy Consumption Intensity :

能源密集度又稱單位國內生產毛額 (Gross Domestic Product, GDP) 能源消耗量，將能源消耗量與 GDP 相除得出。本研究使用最常用之 GDP 計算方法 - 支出面法 (Expenditure Approach)，將民間消費支出、固定投資、政府消費支出與淨出口相加，得出各行政區 GDP 總額。

$$GDP = \text{民間消費支出} + \text{投資} + \text{政府消費支出} + \text{淨出口} \quad (35)$$

$$\text{民間消費支出 } C = \text{戶籍登記戶數} \times \text{平均每戶經常性支出} \quad (36)$$

$$\text{固定投資 } I = \frac{\text{工廠全年固定資產投資金額}}{\text{製造業生產總額}} \times \text{全產業生產總額} \quad (37)$$

$$\text{政府消費支出 } G = \text{全台政府消費支出} \times \frac{\text{全台歲出}}{\text{桃園市歲出}} \times \frac{\text{行政區人口}}{\text{總人口}} \quad (38)$$

$$\text{淨出口 } (X - M) = (\text{商品輸出} - \text{商品輸入}) \times \frac{\text{行政區全年營業支出}}{\text{全國營業支出}} \quad (39)$$



在計算民間消費所得之式(36)中，將各行政區之戶籍數量與桃園平均每戶家庭經常性支出相乘，得出民間消費支出。

固定投資包含製造業與非製造業，不過因缺乏非製造業之固定資產投資資料，本研究假設全產業之固定投資金額與生產總額呈正比，在式(37)中先計算製造業生產總額佔全部產業生產總額之比例，接著再將桃園市工廠全年固定資產投資  $t$  除上總額比例，反推求出全部產業之固定資產投資金額。

政府消費支出由全國政府消費支出計算而得，計算方法如式(38)所示，本研究假設政府消費支出與歲出、人口呈現正相關，先計算桃園市歲出佔全台歲出之比例，接著與全國政府消費支出相乘，進而得出桃園政府消費支出，最後利用各行政區人口比例計算出各行政區之消費支出。

進出口原始資料為全國尺度資料，本研究將全台商品輸出金額減去全台商品輸入金額，即可得出全台灣淨出口資料，本研究利用式(39)進行計算，並假設淨出口金額與全年營收成正比，因此得出各行政區全年營業佔全國全年營業之佔比，將其與全台灣淨出口相乘，即可得到各行政區之淨出口金額。

### c. 碳強度 Carbon Intensity :

碳強度又稱單位 GDP 碳排放量，為  $CO_2$  排放量與 GDP 之比值， $CO_2$  主要有工業、民生和能源三種排放來源，後續將三種來源分別進行計算。

工業與能源之  $CO_2$  排放量方面，本研究定義工業與能源排放由工廠直接和間接之  $CO_2$  排放量加總而成，因為工廠間接排放之  $CO_2$  多源自產生能源；民生  $CO_2$  排放量則參考過去 S.-H. Wang et al. (2018)之研究，研究探討台北都會區人口數量與民生  $CO_2$  排放之相關性，本研究假設桃園市之都會發展程度與台北都會區相同，使用其研究中  $CO_2$  排放與人口數量之線性公式，計算得出桃園市之民生排放，經過加總後得出  $CO_2$  總排放量，最終將其除上 GDP 即為碳強度。

$$CO_2 \text{ 排放量} = \text{工業排放量} + \text{民生排放量} + \text{能源排放量} \quad (40)$$



$$\text{工業排放} + \text{能源排放} = \text{工廠直接排放量} + \text{工廠間接排放量}$$

(41)

$$\text{民生排放量}(1000 \text{ ton CO}_2) = 0.0016 \times \text{人口數(person)} + 2.4196$$

(42)

**d. 工業固體廢棄物 Industrial Solid Waste :**

本研究將工業固體廢棄物設定為事業廢棄物產生量，資料來源為環境部桃園市申報事業廢棄物產生量資料，由於廢棄物產生量為全市資料，因而本研究假設事業廢棄物產生量與全年營業支出呈現正比，將行政區之事業廢棄物量以行政區全年營業支出之比例進行分配。

**e. 電氣化比例 Degree of Electrification :**

電氣化比例為電力消費量與能源消費量之比值，本研究將全國歷年售電量與行政區用電比例相乘，計算得出行政區之電力消費量；能源消費量方面本研究假設各行政區之人均消費量相同，因而將全國人均能源消費量資料與各行政區人口相乘得出能源消費量，最後將電力消費量除以能源消費量即為各行政區之電氣化比例。

### 3.3.3 水子系統

**a. 人均水資源 Per Capita Water Resources :**

本研究使用桃園市內之雨量測站資料進行空間推估，將空間推估數值依據各網格所在行政區分類，計算各行政區之平均降雨量，降雨量常用於水資源計算，過去計算金門縣水資源量之研究，即是利用式(43) 計算水資源量(Chen et al., 2020)。

$$\text{水資源量} = \text{降水量} \times \text{面積} \times \text{徑流率}$$

(43)

本研究將行政區之平均降雨量與行政區面積相乘，得出由降雨量推算之水資源量，然而因水資源多數直接流入海洋，無法被人類使用，因此須再乘上逕



流率，本研究依據過去研究假設逕流率為 0.7，進而得出水資源量，最後將各行政區水資源量除以各行政區人口數，即可得出人均水資源量。

**b. 人均用水量 Per Capita Water Consumption :**

依據經濟部水利署用水統計年報之用水分類，水資源依其用水標之可分為生活用水、工業用水與農業用水，本研究依此三項用水標的進行用水量計算。

$$\begin{aligned} \text{用水量} = & \text{ 桃園市生活用水量} \times \text{行政區人口比例} \\ & + \text{ 桃園市工業用水量} \times \text{行政區工廠數量比例} \quad (44) \\ & + \text{ 桃園市農業用水量} \times \text{行政區農地面積比例} \end{aligned}$$

生活用水方面，本研究假設各行政區之人均用水量相同，因而可與各行政區人口相乘，得出各行政區之用水量；工業用水中本研究假設各家工廠之用水量相同，進而使用桃園市或北區總工業用水資料，根據各行政區之工廠數量進行工業用水量分配；本研究農業用水使用桃園市或北區農業用水資料，並依據各行政區之農地面積進行農業用水量之分配，本研究假設目標作物僅包含水稻及甘藷，忽略其他作物之種植面積，同時認定農地單位需水量相同進行計算。

**c. 單位 GDP 用水量 Water Consumption Per Unit of GDP :**

單位 GDP 用水量為用水量和 GDP 之比值。

**d. 工業額外產值用水量 Water Consumption of Industrial Added Value**

本研究將工業額外產值定義為各行政區工廠營業收入與支出之差值，求出工業額外產值後除以用水量即可得出工業額外產值用水量。

**e. 水資源利用率 Utilization Ratio of Water Resources :**

水資源利用率為用水量與水資源量之比值。



表 8、FEW 永續性指標

子系統	指標	正/負	公式	單位	資料來源
糧食子系統 永續性	人均種植面積	+	農業種植面積 /人口數	ha/person	(Ding, Chen, et al., 2023; Ding, Fang, et al., 2023)
	糧食種植面積比 例	+	農業種植面積 /行政區面積	%	(Ding, Fang, et al., 2023; Liangshi et al., 2021)
	人均糧食生產量	+	糧食收成量 /人口數	ton/person	(Putra et al., 2020) (Yi et al., 2020)
	單位面積糧食生 產量	+	糧食收成量 /農業種植面積	ton/ ha	(Ding, Chen, et al., 2023; Ding, Fang, et al., 2023)
	化肥負荷量	+	農地施肥量 /行政區面積	ton/km <sup>2</sup>	(Nadaraja et al., 2021; Xu et al., 2021)
能源子系統 永續性	人均能源消耗	-	能源消耗量 /人口數	kloe/person	(Sun et al., 2022) (Xu et al., 2021)
	電能密集度	-	能源消耗量 /GDP	kloe/NT\$10,000	(Zhi et al., 2020) (Hu et al., 2021)
	碳強度	-	CO <sub>2</sub> 消耗量 /GDP	ton CO <sub>2</sub> e / NT\$10,000	(Chaudhary et al., 2018; Ding, Chen, et al., 2023)
	工業固體廢棄物	-	工業固體廢棄量	10,000 ton	(Ding, Chen, et al., 2023; Q. Wang et al., 2018)
	電氣化比例	+	電力消費量 /能源消費量	kwh/kloe	(Sun et al., 2022)
水子系統 永續性	人均水資源	+	自來水取水量 /人口數	m <sup>3</sup> /person	(Q. Wang et al., 2018; Yong Wang et al., 2022)
	人均用水量	-	用水量/人口數	m <sup>3</sup> /person	(Jia et al., 2018) (Ding, Chen, et al., 2023)
	單位 GDP 用水量	-	用水量/GDP	m <sup>3</sup> / NT\$10,000	(Yi et al., 2020) (Sun et al., 2022)
	工業額外產值用 水量	+	用水量 /工業額外產值	m <sup>3</sup> / NT\$10,000	(Sun et al., 2022) (Ding, Fang, et al., 2023)
	水資源利用率	+	人均用水量 /人均水資源	%	(Sun et al., 2022) (Junze Zhang et al., 2022)



### 3.3.4 永續性量化指標

本研究在 FEW 子系統中選擇採用熵權重法 (Entropy Weight Method) 計算系統中各指標權重，熵權重法為客觀之權重方法，以指標資訊運算評估得出權重，由於運算客觀性與結果可靠性，熵權重法已被廣泛且成功應用於評估能源永續性與農業永續性(Ding, Fang, et al., 2023)。熵權重法主要有四項步驟，首先將指標進行標準化，以便後續指標間比較，接著運用標準化指標計算熵值，第三步計算各指標權重；最後分別將權重與標準化指標相乘，得出各項指標永續性。

#### 指標標準化

$SusX_{ij}^t$  為 FEW 永續性指標原始數值， $i$  代表指標編號，因 FEW 三項子系統分別由五項指標進行量化， $i$  值為 1 至 15； $j$  代表桃園市行政區數量，行政區數量為 13，故數值為 1 至 13， $t$  代表研究年度，本研究年度為 2007 年、2014 年與 2021 年。

$SusX_{ij}^t$  進行標準化後為  $SusY_{ij}^t$ ，本研究將式(45) 定義為正指標，代表指標數值愈大愈好，反之數值愈小愈好則代表是負指標，計算方法如式(46) 所示， $SusX_{i\max}^t$  代表  $SusX_{ij}^t$  之最大值， $SusX_{i\min}^t$  代表  $SusX_{ij}^t$  之最小值。

正指標 
$$SusY_{ij}^t = \frac{SusX_{i\max}^t - SusX_{ij}^t}{SusX_{i\max}^t - SusX_{i\min}^t} \quad (45)$$

負指標 
$$SusY_{ij}^t = \frac{SusX_{ij}^t - SusX_{i\min}^t}{SusX_{i\max}^t - SusX_{i\min}^t} \quad (46)$$

#### 熵值計算

計算出  $SusY_{ij}^t$  後，第二步使用式(47) 進行各指標熵值 ( $E_i^t$ ) 運算，其中  $n$  表桃園行政區數量，計算得出  $E_i^t$  代表  $i$  年中各指標  $t$  之熵值，各指標熵值均相同。



$$E_i^t = -\ln(n)^{-1} \sum_j p_{ij}^t \ln(p_{ij}^t) , \quad p_{ij}^t = \frac{SusY_{ij}^t}{\sum_j SusY_{ij}^t}$$

### 權重計算

熵值  $E_i^t$  計算完成後，接著第三步要計算各行政區  $j$  指標  $i$  之權重，式(48)至式(50)分別呈現 FEW 系統之權重計算方法，結果代表各指標權重  $\omega_i^t$  佔子系統指標之比例，權重總和均為 1。

糧食子系統

$$\omega_i^t = \frac{1 - E_i^t}{5 - \sum_{i=1}^5 E_i^t} \quad (i = 1, 2, \dots, 5) \quad (48)$$

能源子系統

$$\omega_i^t = \frac{1 - E_i^t}{5 - \sum_{i=6}^{10} E_i^t} \quad (i = 6, 7, \dots, 10) \quad (49)$$

水子系統

$$\omega_i^t = \frac{1 - E_i^t}{5 - \sum_{i=11}^{15} E_i^t} \quad (i = 11, 12, \dots, 15) \quad (50)$$

### 子系統永續性

從式(51)至式(53)分別計算 FEW 永續性，先將各行政區  $j$  指標  $i$  之權重分別與  $SusY_{ij}^t$  相乘，並在各行政區中進行加總，可得出各行政區 FEW 子系統永續性。

糧食子系統

$$FS_j^t = \sum_{i=1}^5 \omega_i^t SusY_{ij}^t \quad (51)$$

能源子系統

$$ES_j^t = \sum_{i=6}^{10} \omega_i^t SusY_{ij}^t \quad (52)$$

水子系統

$$WS_j^t = \sum_{i=11}^{15} \omega_i^t \ SusY_{ij}^t$$



FEW 系統

$$FEWNS_j^t = \sum_{i=1}^{15} \omega_i^t \ SusY_{ij}^t \quad (54)$$



### 3.4 協調度與權衡關係分析

#### 3.4.1 耦合協調度

耦合作用常用於分析子系統間之相互作用，為評估子系統間之協調關係，過去研究提出耦合協調度方法（Coupling Coordination Degree Method, CCDM），Li et al. (2021)利用CCDM自系統角度分析都市化與生態系健康間關係；Yang et al. (2022)則應用CCDM評估關鍵ES與永續發展間關係，顯示CCDM目前永續、環境領域中廣泛運用(Ding, Fang, et al., 2023)。為評估FEW子系統與各項ES間之協調關係，進而了解各行政區綜合FEW與ES之永續性程度，本研究透過CCDM計算桃園市FEW與ES間之耦合協調度（Coupling Coordination Degree, CCD）。

本研究分別計算FEW永續性與ES間之CCD，式(55)中 $D_j^t$ 代表行政區j在t年之CCD，並由 $C_j^t$ 與 $T_j^t$ 所組成，計算 $C_j^t$ 首先利用與式(45)(46)相同概念方法進行標準化，並使用FEW永續性( $FEWNS_j^t$ )與標準化ES( $ESY_{ij}^t$ )進行計算。

式(57)中 $T_j^t$ 為行政區j在t年時，永續性與ES之整體發展等級，其中 $\alpha$ 與 $\beta$ 分別代表FEW永續性與各ES加權因子，因本研究認為FEW永續性與ES對永續發展重要性相當，故將權重 $\alpha$ 與 $\beta$ 皆設為0.5。

$$D_j^t = \sqrt{C_j^t \times T_j^t} \quad (55)$$

$$C_j^t = \sqrt{\frac{FEWNS_j^t \times ESY_{ij}^t}{\left(\frac{FEWNS_j^t + ESY_{ij}^t}{2}\right)^2}} \quad (56)$$

$$T_j^t = \alpha \times FEWNS_j^t + \beta \times ESY_{ij}^t \quad (57)$$

綜合過去研究分類，本研究將CCD分為六種類型，主要分為不協調與協調兩



部分，每部分之協調程度由低至高分別為輕度、中度、高度，詳細類型分類如表 9 所示(Ding, Fang, et al., 2023; Ji et al., 2023)。

表 9、CCD 型態分類

CCD	型態
<b><math>0.2 &gt; D \geq 0</math></b>	高度不協調
<b><math>0.4 &gt; D \geq 0.2</math></b>	中度不協調
<b><math>0.5 &gt; D \geq 0.4</math></b>	輕度不協調
<b><math>0.6 &gt; D \geq 0.5</math></b>	輕度協調
<b><math>0.8 &gt; D \geq 0.6</math></b>	中度協調
<b><math>1 \geq D \geq 0.8</math></b>	高度協調

### 3.4.2 權衡關係

目前 FEW 永續性與 ES 間協調度之相關文獻有限，且儘管 CCDM 可用於評估 FEW 永續性與 ES 間協調度，顯示不同行政區之永續性程度，卻無法反映桃園市內部行政區在 FEW 永續性與 ES 間相關性 (Correlation)。

深入研究 FEW 永續性與 ES 間之相關性，將有助於深入理解 ES 如何對子系統永續性產生影響(Yang et al., 2022)，透過進行相關性分析探討 FEW 永續性與 ES 間之關係(Ding, Fang, et al., 2023)。

Pearson 相關係數 (Pearson's Correlation Coefficient,  $r$ ) 用於衡量兩個變數之線性相關程度，數值介於-1 至 1 間，正負號表示相關性的方向，若  $r > 0$ ，表示正相關，代表兩項變數同時上升或下降；若  $r < 0$ ，則表示負相關，代表一變數增加時另一個減少，相關係數的絕對值越大，其相關程度越高(Ding, Fang, et al., 2023)。

本研究將 Pearson 相關係數概念用於 ES 與 FEW 永續性權衡分析， $r < 0$  代表處於競合關係， $r > 0$  為協同關係，同時參考過去研究，將顯著相關性分為六種型

態，並以顏色進行區分高低(Hou et al., 2017; Lyu et al., 2019; Schirpke et al., 2019; Jian Zhang et al., 2022)。



表 10、Pearson 相關係數型態分類

Pearson 相關係數	型態
$-0.5 \geq r$	高度競合
$-0.3 \geq r > -0.5$	中度競合
$-0.1 \geq r > -0.3$	輕度競合
$0.3 > r \geq 0.1$	輕度協同
$0.5 > r \geq 0.3$	中度協同
$r \geq 0.5$	高度協同



## 第四章 、結果與討論

### 4.1 生態系服務分布模擬

#### 4.1.1 糧食生產

本研究經由 InVEST 之計算，計算出稻米與甘薯在 25、50、75 與 95 分位數之單位面積產量，表 11 顯示稻米在 2007 年、2014 年、2021 年實際產量與模擬產量之比較，經由對比桃園市稻米單位面積產量及總產量，同時利用式(58)計算各分位數模擬產量與實際產量之間之誤差，由於稻米 75 分位數之產量與實際產量誤差值最小，本研究因而選擇 75 分位數之結果設定為模擬產量。

$$\text{誤差} = \frac{\text{模擬產量} - \text{實際產量}}{\text{實際產量}} \times 100\% \quad (58)$$

表 11、稻米 2007 年、2014 年、2021 年實際產量與模擬產量之比較

2007 年	實際產量	模擬產量		模擬產量	
		25th	50th	75th	95th
總產量(ton)	88715	61284.35	80435.40	94433.59	128396.45
誤差		-30.92%	-9.33%	6.45%	44.73%
單位產量(ton/ha)	5.242	3.14	4.48	5.26	7.15
誤差		-40.04%	-14.54%	0.33%	36.42%
2014 年	實際產量	模擬產量		模擬產量	
		25th	50th	75th	95th
總產量(ton)	74595	50767.06	66686.16	78219.30	107946.35
誤差		-31.94%	-10.60%	4.86%	44.71%
單位產量(ton/ha)	5.153	3.43	4.51	5.28	7.29
誤差		-33.44%	-12.57%	2.56%	41.53%
2021 年	實際產量	模擬產量		模擬產量	
		25th	50th	75th	95th
總產量(ton)	36449	21183.17	27803.53	32688.17	45571.70
誤差		-41.88%	-23.72%	-10.32%	25.03%
單位產量(ton/ha)	5.145	3.50	4.60	5.41	7.54
誤差		-31.88%	-10.59%	5.12%	46.55%

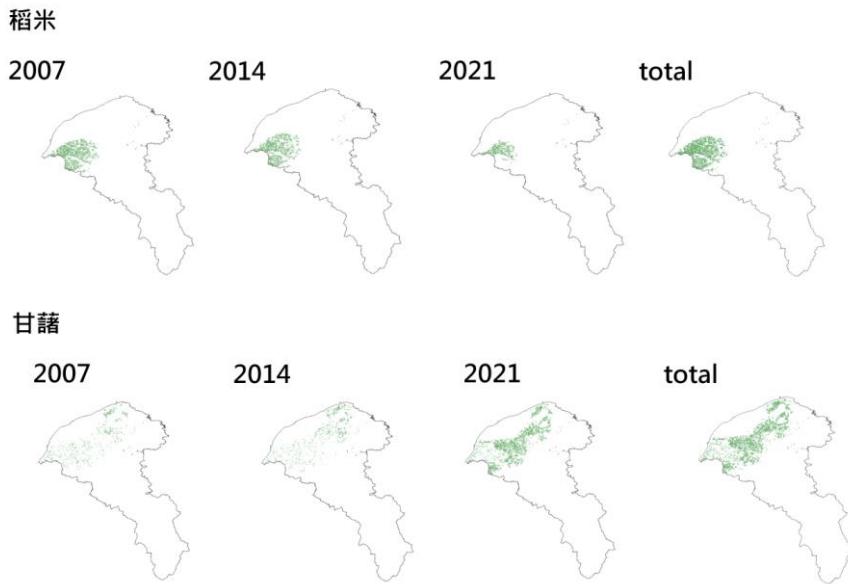


圖 8、稻米與甘薯 2007 年、2014 年、2021 年與三年合併分布

由圖 10 可清楚了解糧食生產之分布區域，新屋、楊梅與大園區等農業區與沿海地區為主，新屋、楊梅等地主要種植稻米，大園、觀音等沿海地區旱地種植甘薯，都會區與森林山區則幾乎沒有糧食生產之分佈。而從圖 9 可觀察到糧食產量於 2007 年時最高，並隨著時間推移逐漸下降，至 2021 年時之糧食產量約略僅剩 2007 年之三分之一。

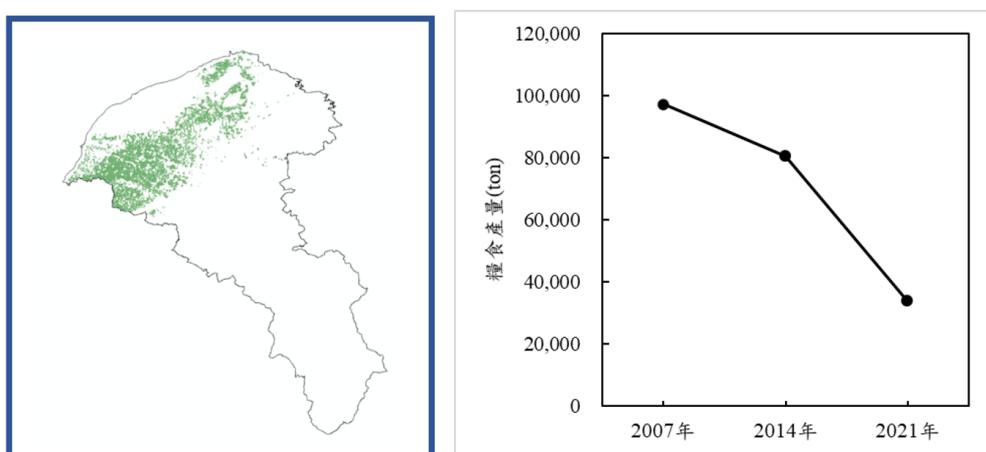


圖 9、糧食生產合併分布區域及歷年糧食產量變化圖

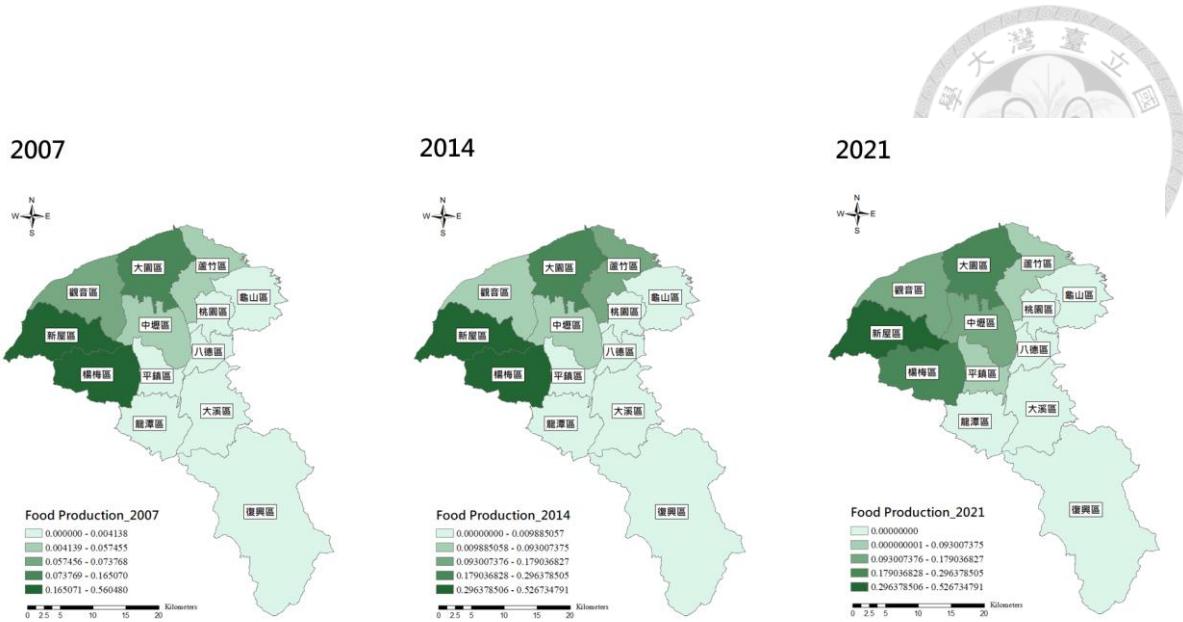


圖 10、糧食生產 2007 年、2014 年、2021 年行政區分布

#### 4.1.2 沉積物遞移

InVEST 計算結果採用沉積物避免輸出量（Avoid\_Export）作為沉積物保留量，用以計算歷年沉積物保留變化。由圖 11 可見沉積物保留強之區域主要集中在山區，在 2007 年呈現連續分布，而在 2014 年及 2021 年呈現零碎化分布；圖 12 之歷年沉積物保留量變化顯示其在 2007 年呈現最高值，到 2014 時減少超過一半，而在 2021 年時反彈回升。



圖 11、2007 年、2014 年、2021 年沉積物保留分布

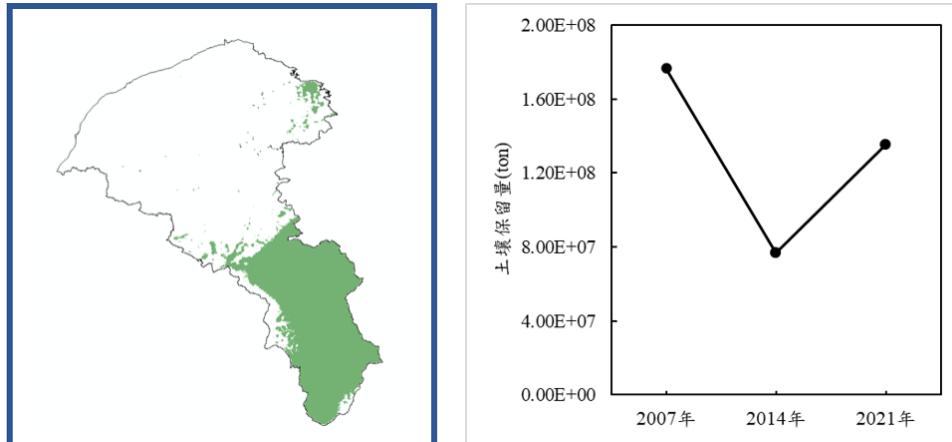


圖 12、沉積物保留合併分布區域及歷年沉積物保留量變化圖

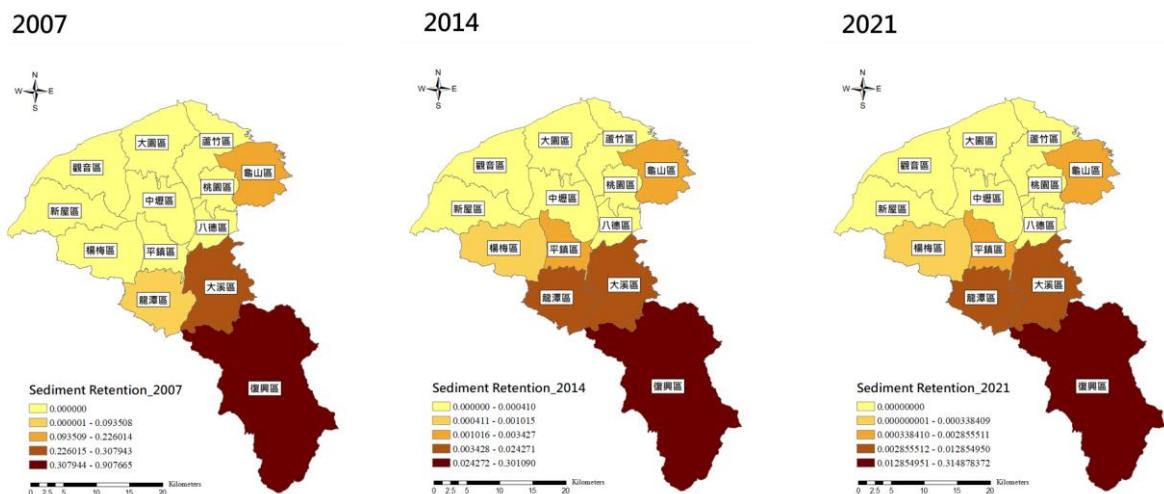


圖 13、沉積物保留 2007 年、2014 年、2021 年行政區分布

#### 4.1.3 碳儲存與吸存

InVEST 計算結果採用總碳儲存量(tot\_c\_cur)，用以計算歷年 ES 變化，由圖 14 及圖 16 碳儲存分布，碳儲存主要集中在地形起伏且避開河道之位置，尤其以大溪、復興及龜山區為主，同時零星分布在新屋、觀音所在之農業區，歷年分布區域沒有顯著差異；從圖 15 之歷年碳儲存變化可得，碳儲存量自 2007 年來持續下降，然而整體變化幅度不大，大約維持在  $10^7$  公噸之年碳儲存量。

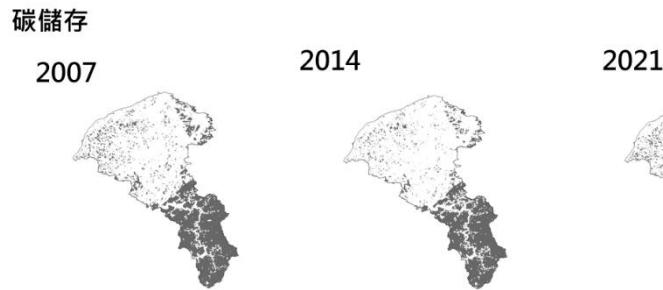


圖 14、2007 年、2014 年、2021 年碳儲存分布

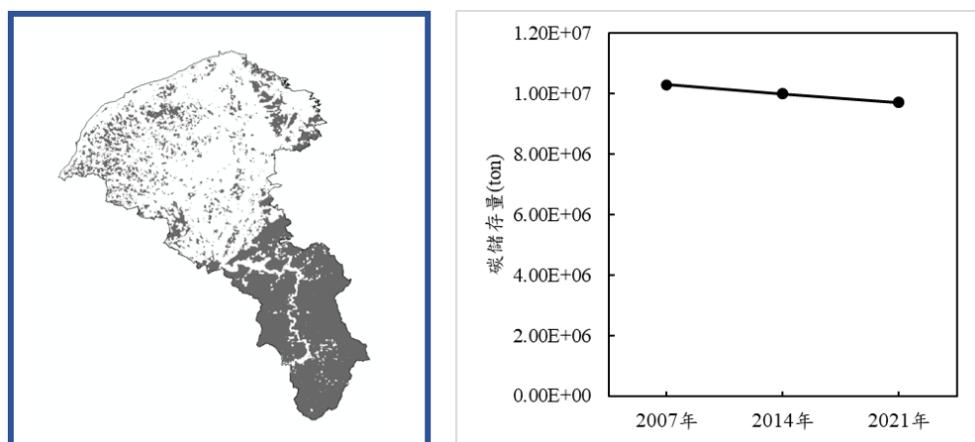


圖 15、碳儲存合併分布區域及歷年碳儲存量變化圖

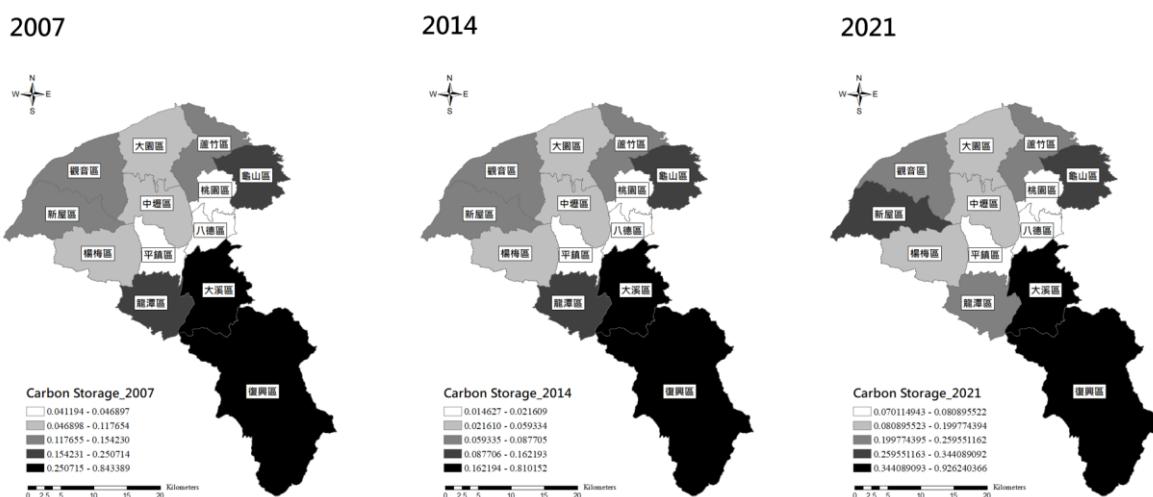


圖 16、碳儲存 2007 年、2014 年、2021 年行政區分布



#### 4.1.4 都市降溫

InVEST 計算結果採用熱調適指數 (Heat mitigation Index,  $HM_i$ )，數值愈高代表該地區生態系統提供之降溫服務愈好。由圖 17 及圖 19 可觀察到高熱調適能力主要在森林區之大溪與復興，其次則處在觀音、新屋與楊梅所在之農業區，2007 年至；圖 18 之歷年熱調適指數變化，熱調適指數 2007 年至 2021 年維持穩定下降，顯示桃園市整體降溫能力之持續降低，同時溫室效應造成之溫度差，由 2007 年  $0.6673^{\circ}\text{C}$  持續增長，2014 年達到  $0.7108^{\circ}\text{C}$ ，2021 年時則為  $0.7592$ ，溫度差增長呼應熱調適指數持續下降而導致愈加強烈之溫室效應。



圖 17、2007 年、2014 年、2021 年都市降溫分布

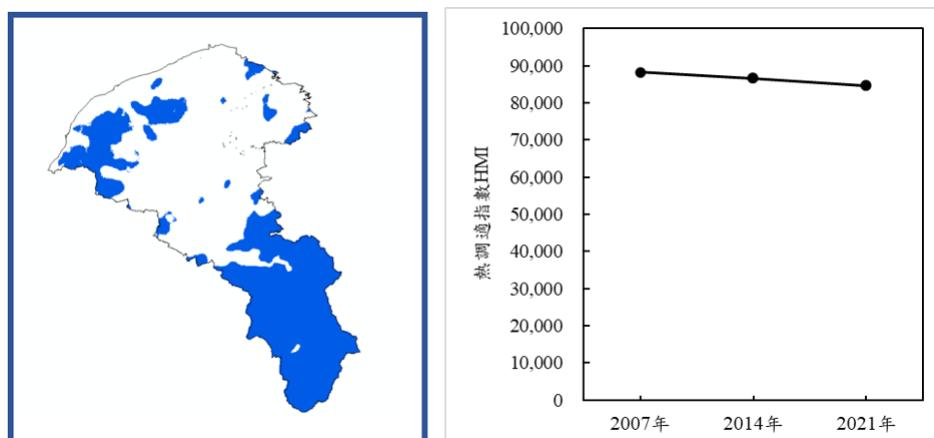


圖 18、都市降溫合併分布區域及歷年熱調適指數變化圖

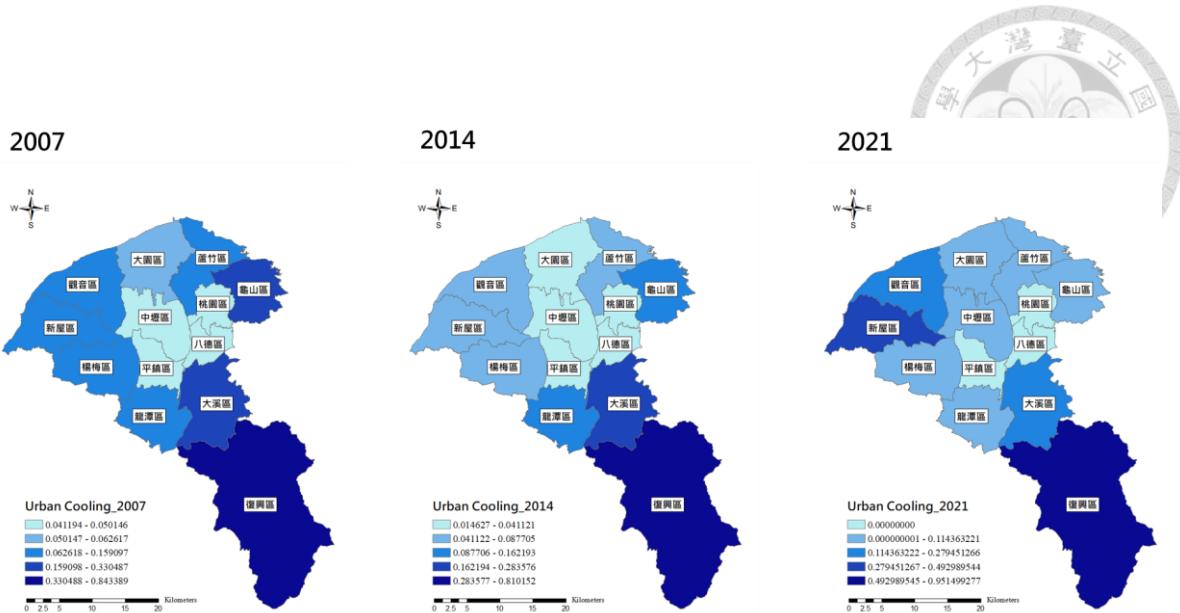


圖 19、都市降溫 2007 年、2014 年、2021 年行政區分布

#### 4.1.5 营養鹽遞移

InVEST 計算出氮地表輸出量(*n\_surface\_export*)與磷地表輸出量(*p\_surface\_export*)，本研究將兩種營養鹽之輸出量最大值減去各網格輸出量，進而得出營養鹽保留量。

由圖 20 與圖 22 展示歷年氮及磷之保留能力，氮保留能力強之區域主要集中於山勢起伏區域，如復興、大溪、龜山等，磷保留能力強之區域則集中在龍潭、楊梅等農業區。2014 年山區之高磷保持能力區域相較於 2007 年明顯增加，然而至 2021 年卻急遽減少，高磷保持能力區域分佈由山區之復興、大溪轉移至農業區之楊梅、龍潭。圖 21 提及之營養鹽保留量包含氮保留量及磷保留量，與歷年相比 2014 年之營養鹽保留量最低，然而 2021 年營養鹽保留量回升反彈，成為歷年最大值。

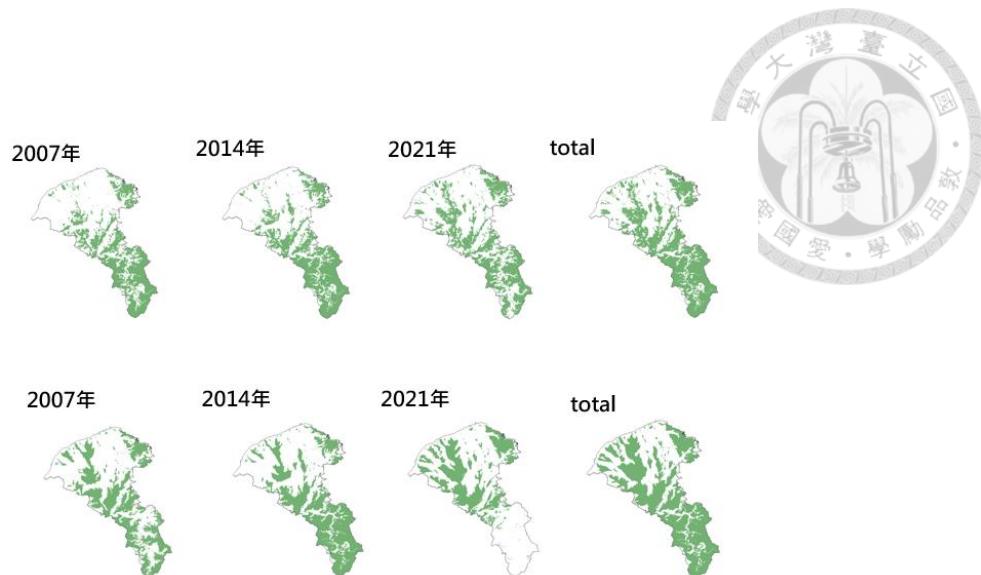


圖 20、2007 年、2014 年、2021 年氮與磷保留能力與歷年合併分布

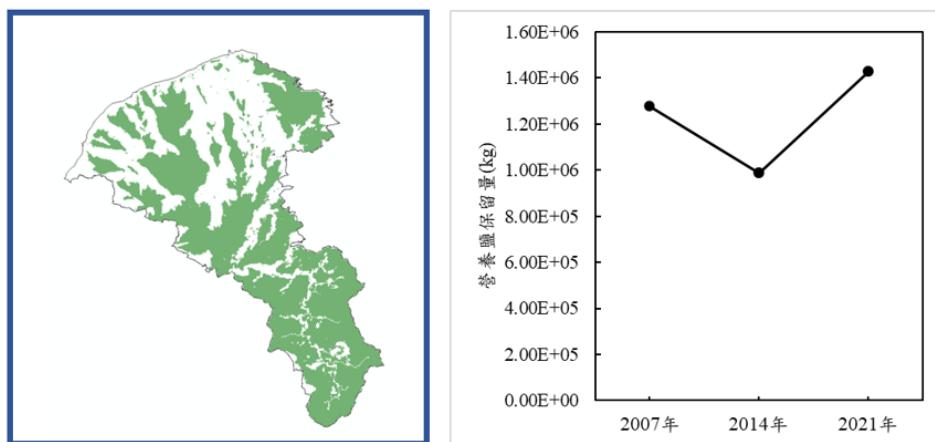


圖 21、營養鹽保留合併分布區域及歷年營養鹽保留量變化圖

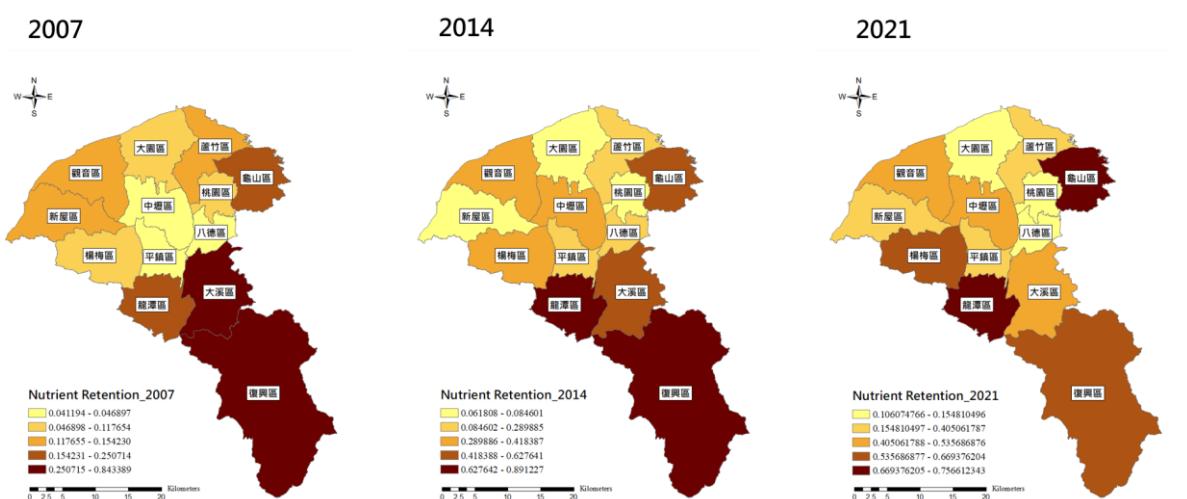


圖 22、營養鹽保留 2007 年、2014 年、2021 年行政區分布



#### 4.1.6 產水量

InVEST 計算出年產水量，本研究直接將其視為產水量，由圖 23 及圖 26 展示歷年產水量，2007 年與 2021 年中產水量高之區域主要集中在復興、大溪山區，2014 年則集中在地勢較平坦之中壢、桃園、平鎮、八德等城市區域；圖 25 中則描述歷年產水量變化，2007 年時產水量高達 2.7 億公噸，為此三年中產水量之峰值，然而 2014 年時其數值直接降至約 1.5 億公噸，2021 年產水量微幅上升，不過仍遠低 2007 年產水量。

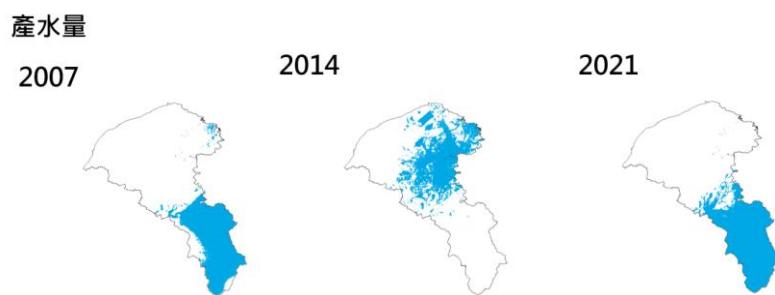


圖 23、2007 年、2014 年、2021 年產水量分布

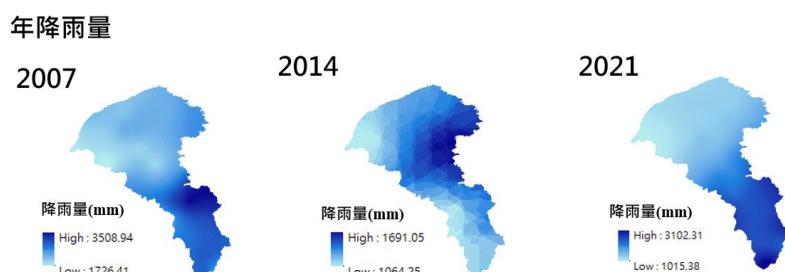


圖 24、2007 年、2014 年、2021 年年降雨量分布

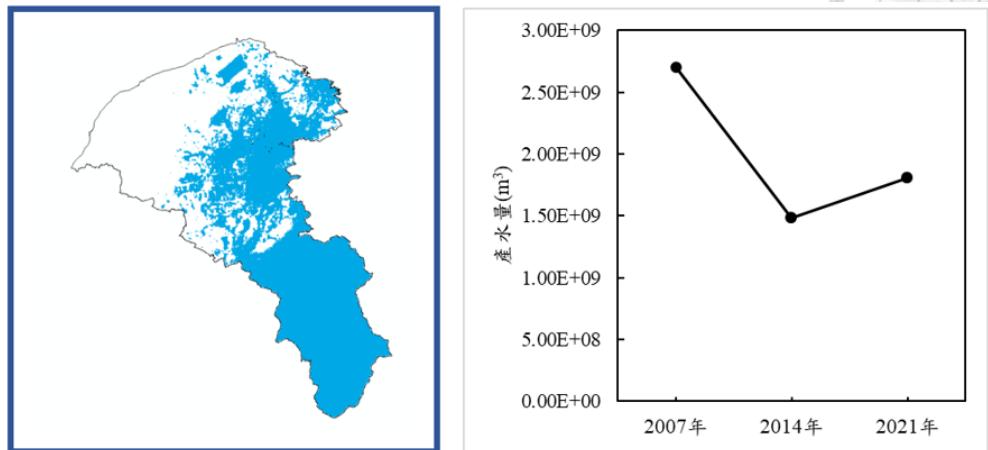


圖 25、產水量合併分布區域及歷年產水量變化圖

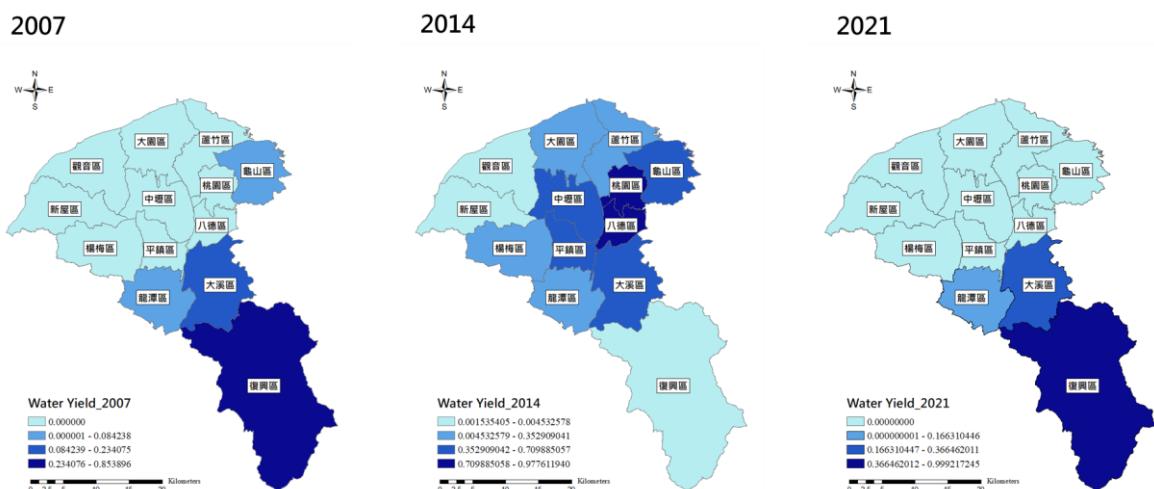


圖 26、產水量 2007 年、2014 年、2021 年行政區分布

#### 4.1.7 ES 熱區結果

綜合熱區由 ES 數量進行選取，在圖 27 展現各年之 ES 數量分布，數值愈高代表該地區 ES 種類愈多，其中種類數量之最大值為 5。2007 年 ES 數量主要集中在山區，其次則零星分布在新屋、楊梅之農業區，以及多分佈丘陵之龜山；2014 年降雨



量分布較為特殊，影響沉積物保留、營養鹽保留與產水量這些與降雨量影響甚大之。ES，造成 ES 數量分布分散；2021 年 ES 主要集中在山區與農業區，與 2007 年之分布類似，然而 ES 數量普遍降低，由圖 28 可以清楚 ES 數量之變化，ES 數量為 5 之區域於 2021 年佔整體之 5.41%，遠低於 2007 年之 17.3%。

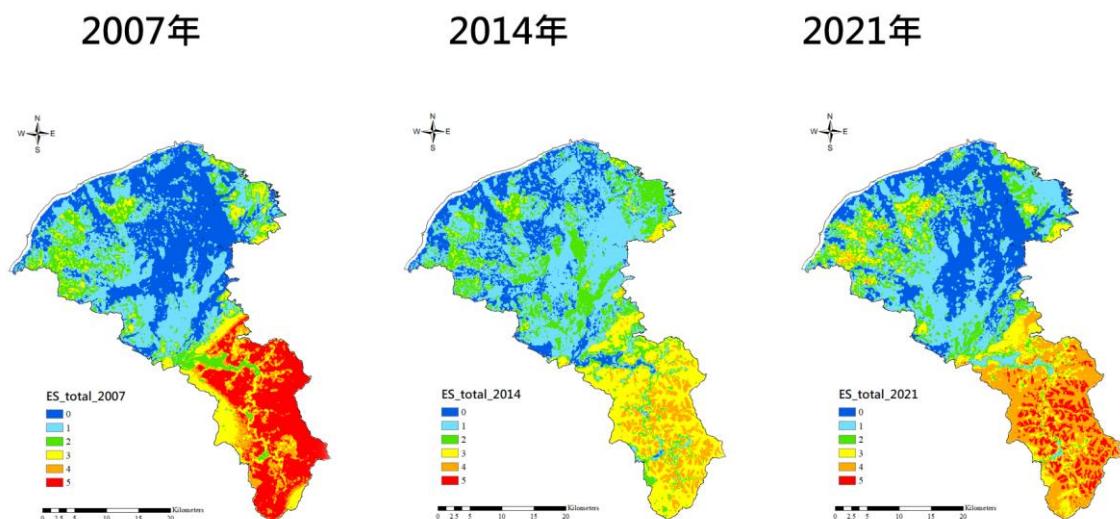


圖 27、2007 年、2014 年、2021 年 ES 種類數量分布

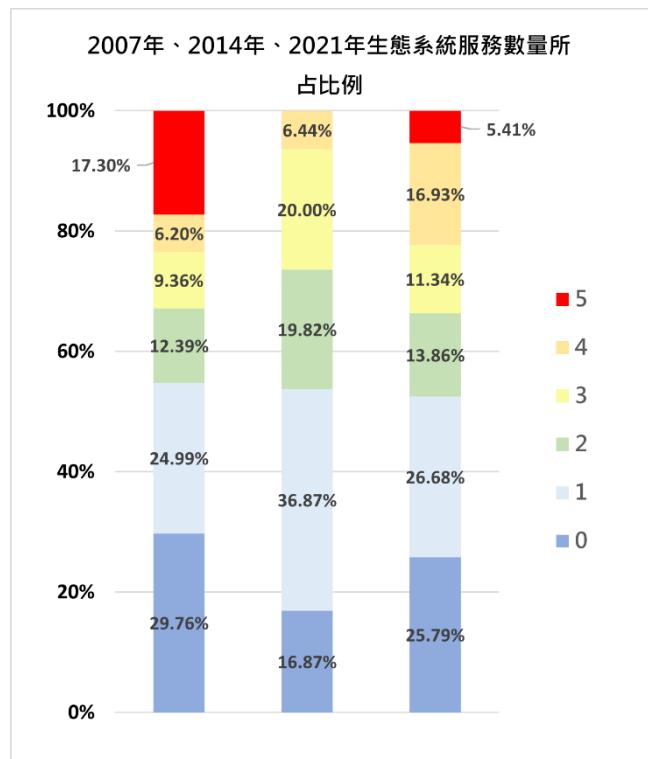


圖 28、2007 年、2014 年、2021 年 ES 數量所占比例

本研究將 ES 數量大於等於 4 之區域設定為 ES 熱區，2007 年所佔區域佔整體之 23.5%，與 2021 年之佔比 22.34% 相差不遠，而 2014 年相比之下之熱區佔比明顯減少，僅佔整體面積之 6.44%。

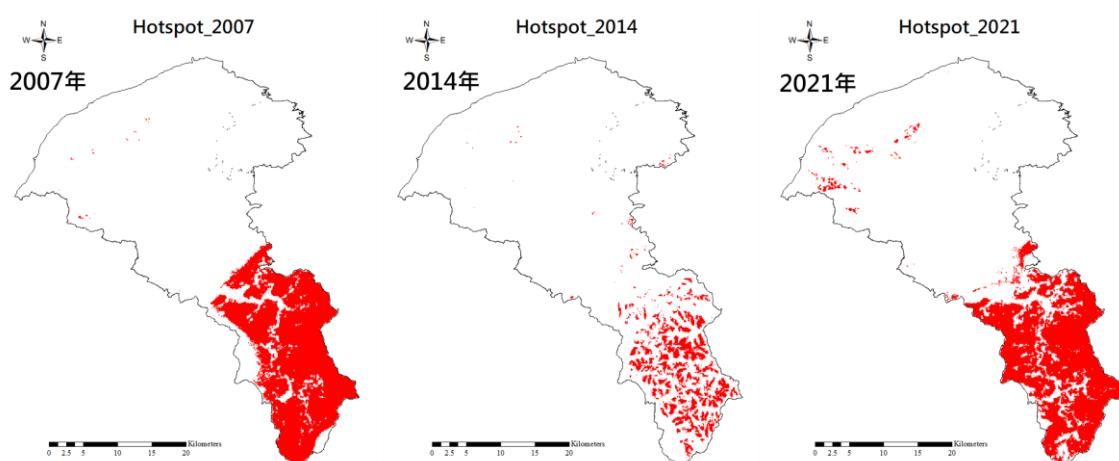


圖 29、2007 年、2014 年、2021 年熱區分佈



圖 30 中呈現 2007 年各行政區 ES 數值，其中復興區 ES 數值遙遙領先各行政區，其次 ES 數值排序依序為大溪、龜山、新屋及楊梅，大溪區與龜山區地形較多起伏，ES 組成主要以營養鹽保留為主；新屋區與楊梅區則因位處農業區，糧食生產成為該地區 ES 大宗。圖 31 中 2014 年之 ES 數值仍以復興區最高，不過較 2007 年缺少產水量這項 ES，相反其餘多數行政區之 ES 數值因產水量而上升，增加幅度以位處都會區之八德區與桃園區最大。圖 32 展示 2021 年之 ES 數值同樣以復興區最高，然而與 2007 年相比 ES 之占比有所改變，2021 年時營養鹽保留及沉積物保留皆下降；新屋超越大溪成為 ES 數值次高之行政區，起因於新屋區營養鹽保留之增加，以及 2021 年沉積物保留普遍降低所致。

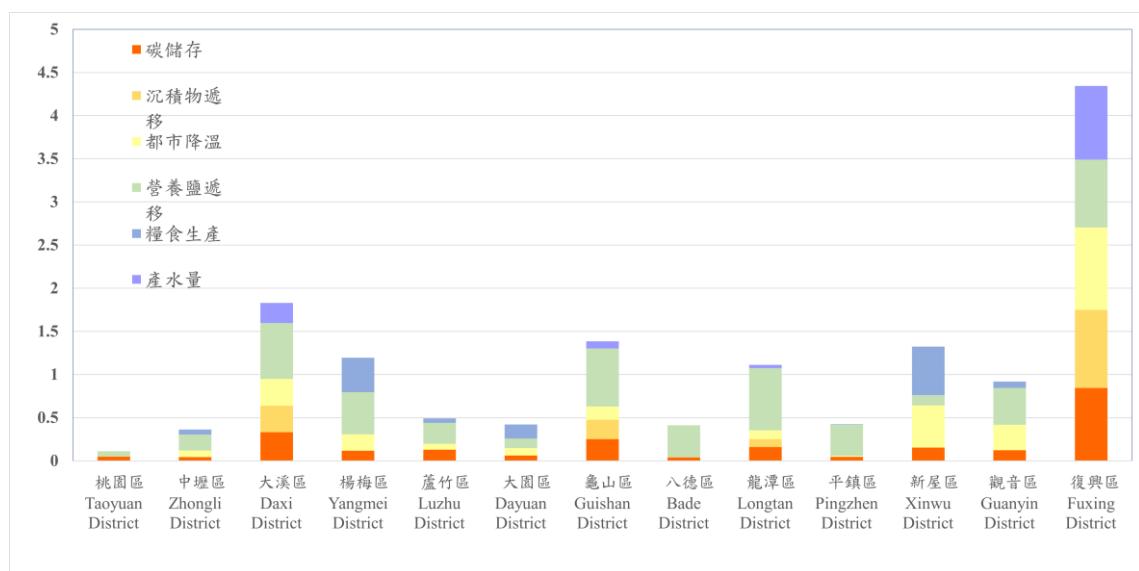


圖 30、2007 年各行政區 ES 數值

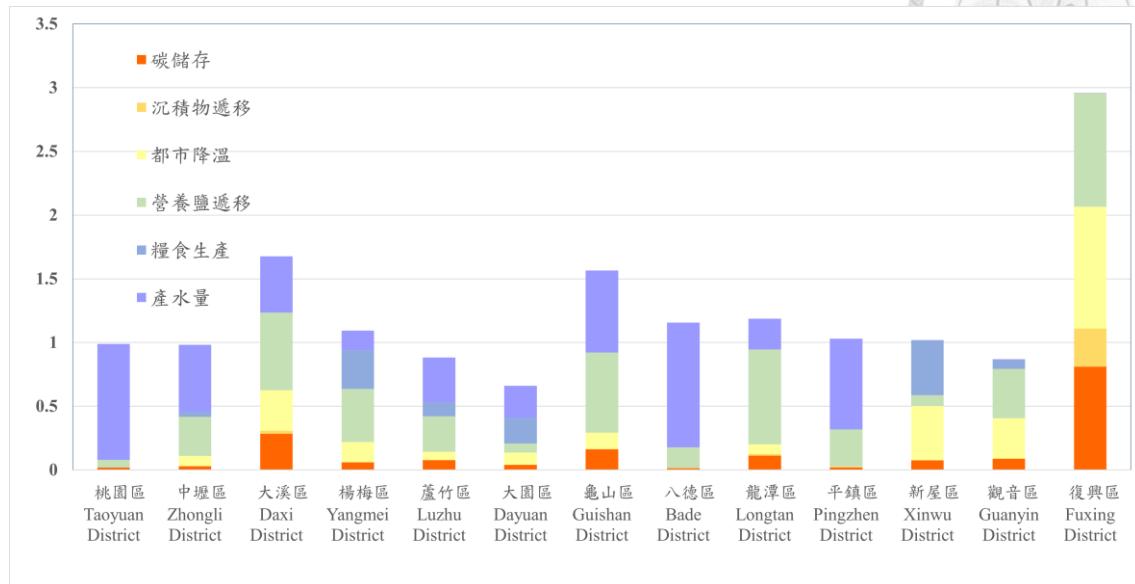


圖 31、2014 年各行政區 ES 數值

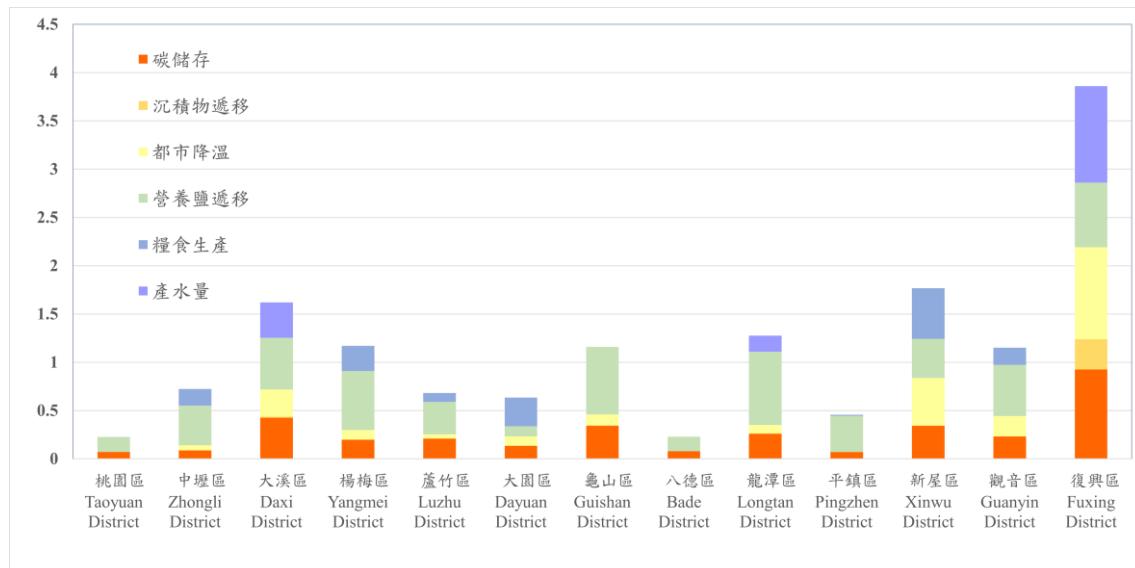


圖 32、2021 年各行政區 ES 數值



#### 4.1.8 ES 热區討論

本研究探討糧食生產空間分布，認為桃園、八德等都會區可能因人口聚集、土地型態多為建地而缺乏糧食生產；大溪、復興等森林區，人口密度低且具農地分佈，然而糧食生產偏低之原因可能是作物種類所致。本研究在糧食生產上僅討論稻米與甘藷，尚未能涵蓋其他作物，例如大溪盛產之茶葉、復興盛產之水果和高山蔬菜等，如果將這些作物納入，其糧食生產之分布與數量會有所變動。

碳儲存利用土地利用之碳庫參數計算而成，計算結果將與土地利用具高度相關，森林、草地與農地之碳庫係數大於建地，因此森林、草地與農地之碳儲存將遠超過建地，桃園市近年都市化擴張所導致建地占比上升，符合研究結果呈現之碳儲存量下降趨勢。本研究碳儲存微幅下降之結果與過去研究相反，過去研究黃河流域與中國山西省之碳儲存呈現上升趨勢，顯示透過三北防護林、退耕還林等植被復育政策，中國植被覆蓋度獲得改善，促使碳儲存之提升(Yang et al., 2022; Yin et al., 2023)。

沉積物保留量由土壤侵蝕量與攔截來自上游之沉積物這兩部分構成，2014年之降雨量為歷年最低，土壤侵蝕量不易受到雨水侵蝕而降低，同時上游輸送下來之沉積物量因土壤侵蝕量降低而減少，造成2014年土壤保留量為歷年最低值。沉積物保留區域與碳儲存區域存在類似的空間分布，皆位在桃園市東南方山區，與過去研究長三角與中國山西省之結果相同(Ding, Fang, et al., 2023; Yang et al., 2022)。

降雨量是影響營養鹽保留的重要因素，2014年雨量明顯低於往年平均值，且降雨分布與往年集中在山區不同，2014年之降雨集中在桃園台地上，山區受到較少雨水侵蝕，因此氮及磷之高保留能力分布才會較2007年廣，同時因營養鹽之地表輸出量減少，所能保留營養鹽量也隨之降低。圖24顯示2007年、2014年與2021年之降雨量分布，明顯觀察2007年及2021年之降雨量分布在山區，降雨量遠多於2014年，2014年之降雨分布與產水量也不謀而合，顯示產水量與降雨量之空間分布呈現高度相關(Yang et al., 2022)。



#### 4.1.9 ES 權衡關係

本研究使用 Pearson 相關係數量化 ES 間之權衡關係，同時使用藍色代表正相關性，紅色代表負相關性，顏色愈深代表相關性愈大，同時本研究計算 p 值在不同檢驗條件中是否顯著，以 \* 代表輕度顯著 ( $p < 0.05$ )，以 \*\* 代表中度顯著 ( $p < 0.01$ ) 時為顯著，以 \*\*\* 代表高度顯著 ( $p < 0.001$ )。

表 12 顯示 2007 年碳儲存、沉積物保留、營養鹽保留及產水量間皆為高度協同，然而這四項 ES 與糧食生產大多呈現輕度競合，其中營養鹽保留與糧食生產間為中度競合，Pearson 相關係數為 -0.3496；都市降溫為唯一與糧食生產為協同之 ES，Pearson 相關係數值為 0.4512，呈現中度協同關係。表 13 展現 2014 年 Pearson 相關係數，其結果與 2007 年類似，唯有產水量展現截然不同相關性，2014 年產水量與其餘五項 ES 為中度或高度競合，推測 2014 年降雨量分布與歷年不同所致。表 14 展示 2021 年 ES 之間之權衡關係，整體與 2007 年結果相似，不過 Pearson 相關係數下降，顯示 ES 間協同關係日漸減弱，而競合關係逐漸增強。

綜合六項 ES 間關係，發現歷年碳儲存、沉積物保留、都市降溫彼此擁有高度協同關係，營養鹽保留與前面三者亦為協同關係。糧食生產歷年與多數 ES 呈現競合關係，唯有和都市降溫呈現輕度協同。產水量與碳儲存、沉積物保留與都市降溫通常為高度協同，不過產水量容易受到降水空間分布影響，Pearson 相關係數也連帶產生變化。

表 12、2007 年 ES 之間 Pearson 相關係數

2007 年	糧食生產	沉積物保留	碳儲存	都市降溫	營養鹽保留	產水量
糧食生產	1					
沉積物保留	-0.2818	1				
碳儲存	-0.1626	0.9851***	1			
都市降溫	0.2049	0.8328***	0.8965***	1		
營養鹽保留	-0.3496	0.6732*	0.6640*	0.4512	1	
產水量	-0.2403	0.9872***	0.9774***	0.8581**	0.5941*	1



表 13、2014 年 ES 之間 Pearson 相關係數

2014 年	糧食生產	沉積物保留	碳儲存	都市降溫	營養鹽保留	產水量
糧食生產	1					
沉積物保留	-0.2198	1				
碳儲存	-0.2366	0.9610***	1			
都市降溫	0.1119	0.8674***	0.9003***	1		
營養鹽保留	-0.4260	0.6196*	0.7336**	0.5437	1	
產水量	-0.5417	-0.3613	-0.4075*	-0.6508*	-0.3342	1

表 14、2021 年 ES 之間 Pearson 相關係數

2021 年	糧食生產	沉積物保留	碳儲存	都市降溫	營養鹽保留	產水量
糧食生產	1					
沉積物保留	-0.2347	1				
碳儲存	-0.1104	0.8787***	1			
都市降溫	0.1484	0.8618***	0.9345***	1		
營養鹽保留	-0.1745	0.3380	0.5749*	0.4011	1	
產水量	-0.3225	0.9420***	0.9155***	0.8501***	0.4258	1



## 4.2 FEW 永續性指標評估

### 4.2.1 資料計算驗證

本研究在計算行政區永續性指標時，因為資料來源限制可能導致誤差，此處以 GDP 為例進行計算數值與歷年全台灣統計之 GDP 數值進行驗證，驗證方法分為兩部分，一部分比較民間消費支出、固定投資、政府消費支出及進出口分別佔整體 GDP 總值之比例，並計算回歸數值  $R^2$ ；另一部分則比較桃園市與台灣之人均 GDP 數值。

表 15 中民間消費支出佔比最大，約佔整體 GDP 之 45% 至 55%，歷年比較中 2007 年桃園市佔比低於全台灣佔比，2014 年及 2021 年則基本相同；固定投資為桃園市與全台灣佔比差距最小之項目，數值維持在 20% 至 27% 之範圍；政府消費支出佔整體 GDP 11% 至 15%，是四大項目中佔比最小之項目，2014 年時桃園市 GDP 佔比低於全台灣之佔比，推測工商業發展促使其餘項目提升，然而 2014 年 12 月桃園市才升格成直轄市，政府消費支出尚未增加，方導致政府消費支出被低估；進出口是桃園市與全台灣數值差距最大之項目，進出口資料僅有國家尺度資料，資料降尺度會產生偏差，導致進出口佔比差距最高，且桃園市為工業重鎮，進出口產值即會高於台灣平均，因此桃園市進出口佔比高於台灣佔比是合理之。綜合比較桃園市與台灣之 GDP 四大項目歷年之佔比，計算得出回歸數值  $R^2$  為 0.9674，呈現顯著之線性迴歸，顯示本研究自行計算之 GDP 具有一定可信度。

歷年桃園市之人均 GDP 由 2007 年 628793 元提升至 2021 年之 930755 元，由於桃園市工商業發達，人口眾多且為直轄市，故本研究得出之桃園市歷年人均 GDP 皆高於該年台灣人均 GDP 數值。



表 15、2007 年、2014 年、2021 年桃園市與台灣 GDP 四大項目組成佔整體 GDP 比例與人均 GDP 數值

	民間消費支出	固定投資	政府消費支出	進出口	人均 GDP(TWD)
2007 年桃園	48.29%	24.20%	14.15%	13.08%	628793
2007 年全台	53.81%	24.09%	14.58%	7.40%	583133
佔比差距	-10.26%	0.46%	-2.95%	76.76%	7.83%
2014 年桃園	53.75%	20.95%	11.21%	14.09%	699084
2014 年全台	52.91%	22.33%	14.52%	10.00%	694680
佔比差距	1.59%	-6.18%	-22.80%	40.90%	0.63%
2021 年桃園	45.49%	25.58%	13.45%	18.32%	930755
2021 年全台	44.80%	26.27%	13.59%	14.19%	923086
佔比差距	1.54%	-2.63%	-1.03%	29.11%	0.83%

#### 4.2.2 永續性指標

FEW 子系統分別各以五項指標計算出其永續性指標，永續性指標以分位數之方法分成六項級距。圖 33 顯示糧食永續性指標之分佈，新屋、觀音及楊梅為農業區範圍，高糧食生產產量及高種植面積強化糧食永續性，復興區人口級距與其他行政區相差甚遠，使之指標除以人口數後維持高值；能源永續性之地理分布呈現於圖 34，能源永續性高之行政區主要分佈在大溪、復興之森林區，以及八德、桃園、中壢、平鎮等人口密集之都會區，工業區與農業區之能源永續性較低，起因於工業區高能源消耗、高 CO<sub>2</sub> 排放，農業區則由於農業生產總值較低，單位 GDP 之能源消耗和 CO<sub>2</sub> 排放較低所致；圖 35 之水子系統永續性主要集中工業區及森林區，工業區用水量不少，不過 GDP 產值超過 35%，相較農業 GDP 產值僅佔 2% 相差甚遠，此外農業用水量佔約 70%，高用水量使農業區單位水資源 GDP 產值較低，永續性因而偏低，森林高永續性則歸功於山區豐沛降雨量，豐富水資源提升整體永續性。

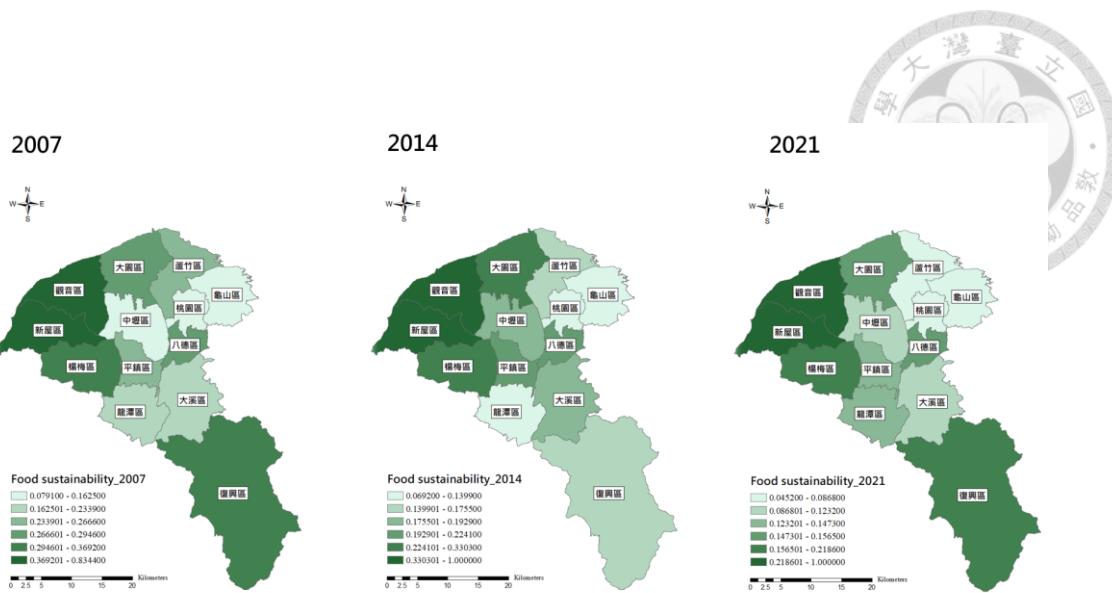


圖 33、2007 年、2014 年、2021 年糧食子系統永續性指標分佈

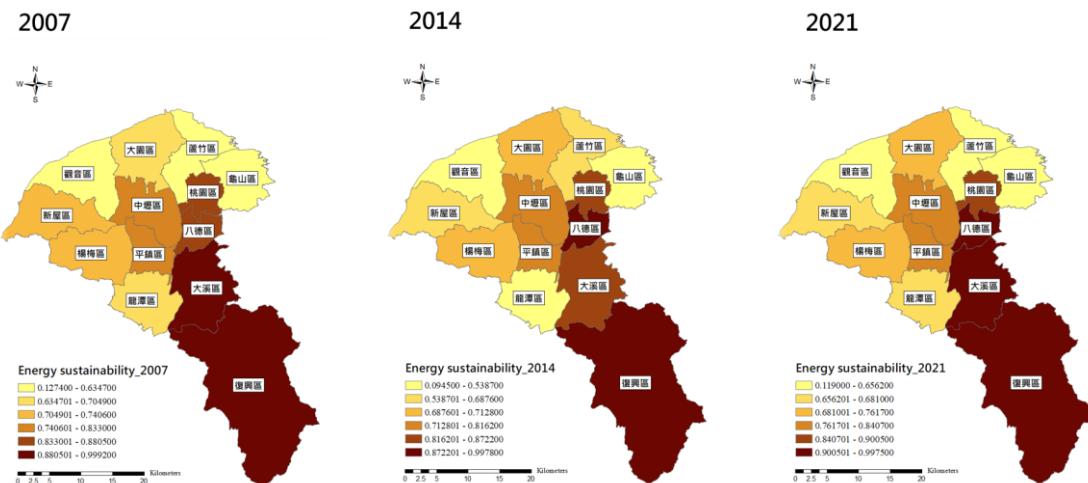


圖 34、2007 年、2014 年、2021 年能源子系統永續性指標分佈

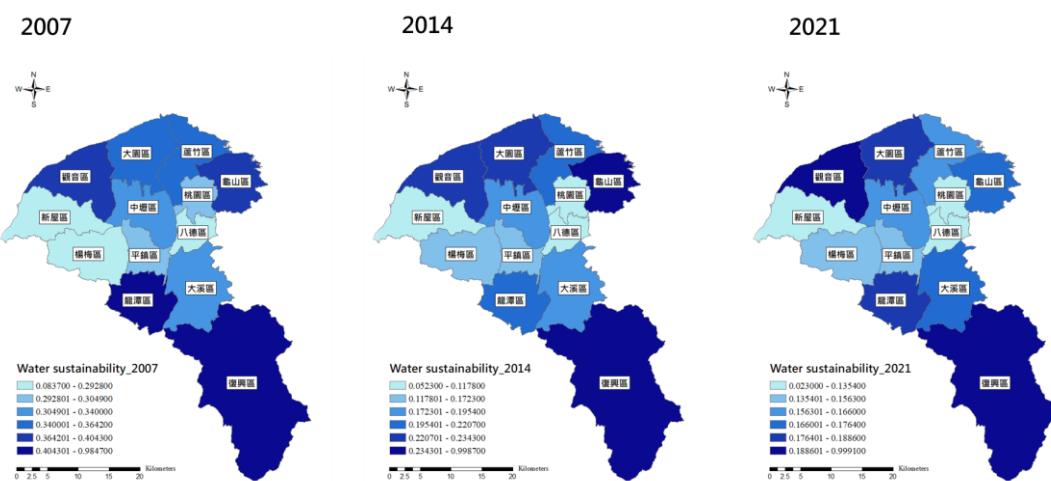


圖 35、2007 年、2014 年、2021 年水子系統永續性指標分佈

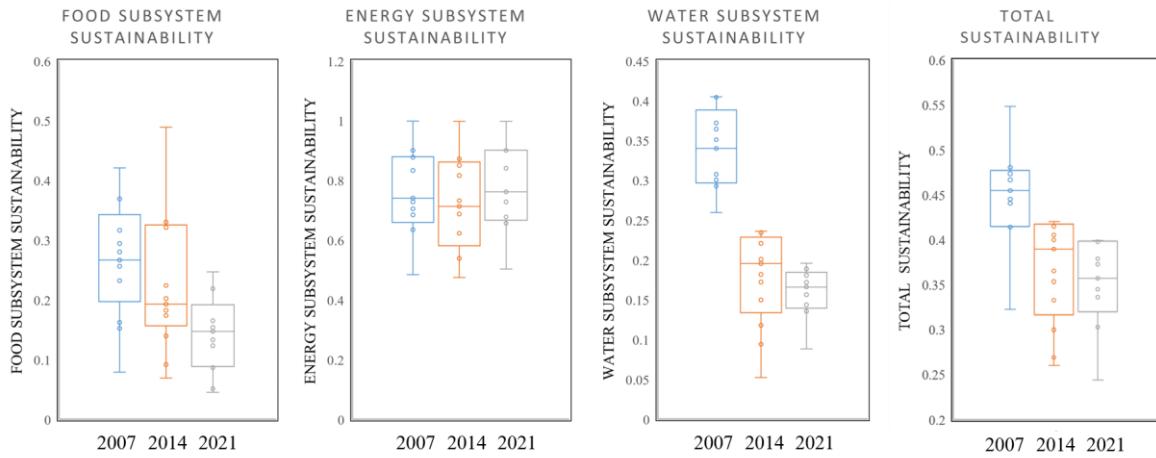


圖 36、研究區 2007 年、2014 年、2021 年 FEW 永續性

桃園市 13 個行政區在 FEW 子系統永續性之時間變化趨勢如圖 36。糧食子系統永續性與水子系統永續性之平均值呈現下降趨勢，尤其在 2007 年至 2014 年間有明顯降幅。

糧食子系統永續性平均值從 2007 年之 0.267 下降至 2014 年之 0.193，並持續下降至 2021 年之 0.147；能源子系統永續性指數從 2007 年之 0.741 下降到 2014 年之 0.713，接著微幅上升到 2021 年之 0.762；水子系統永續性平均值從 2007 年之 0.34 急遽下降至 2014 年之 0.195，並下降至 2021 年之 0.166。

在三個子系統永續性之共同作用下，FEW Nexus 之平均值呈現下降趨勢，從 2007 年之 0.455 下降到 2021 年之 0.357，與 Ding, Fang, et al. (2023) 永續性下降趨勢相同。

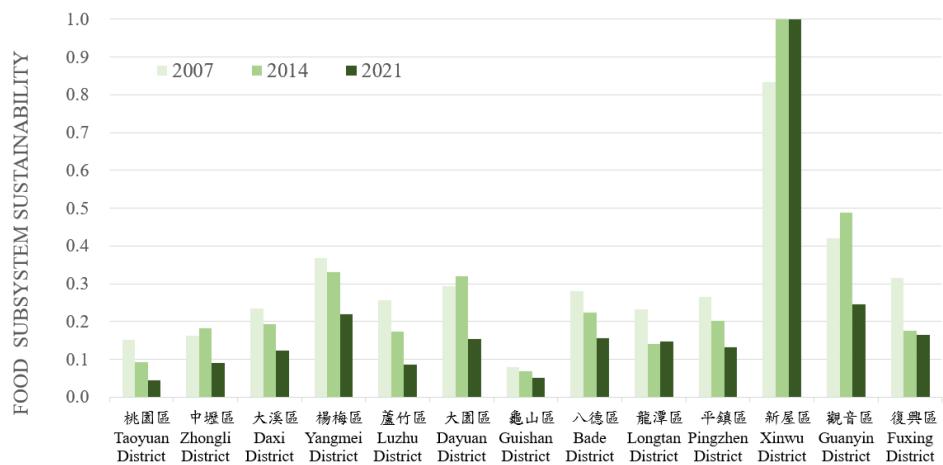


圖 37、桃園市各行政區之糧食子系統永續性

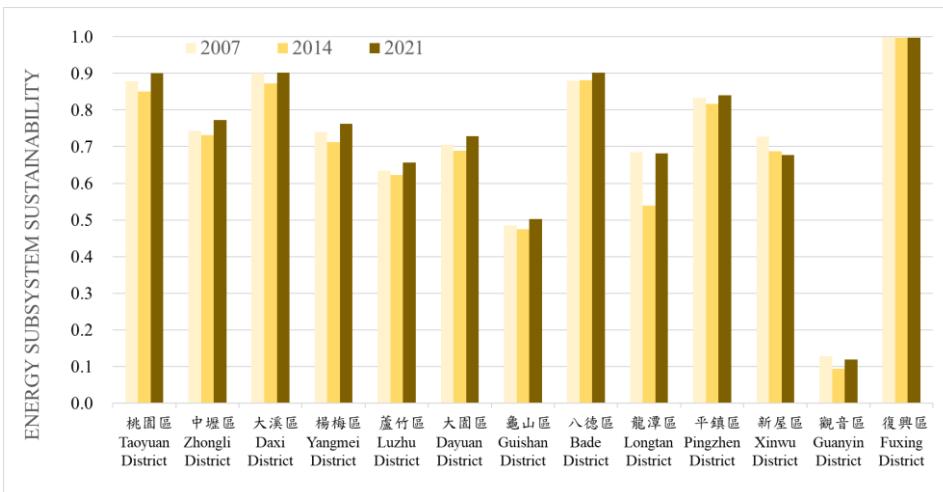


圖 38、桃園市各行政區之能源子系統永續性

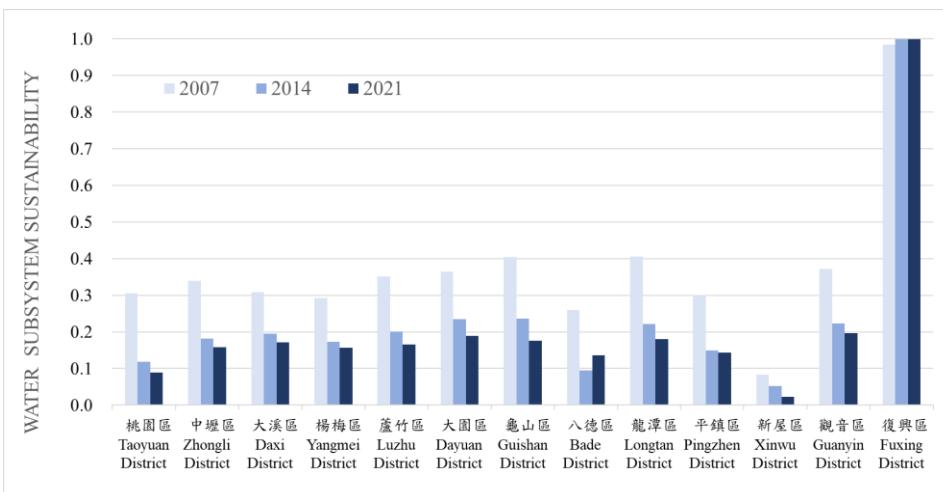


圖 39、桃園市各行政區之水子系統永續性



#### 4.2.3 热區內外之永續性

表 16 展現熱區與桃園市之 FEW 子系統永續性差異。糧食子系統永續性僅在 2007 年時熱區內永續性大於桃園市整體平均，其餘年分皆低於桃園市平均值；能源子系統永續性歷年熱區永續性都大於桃園市整體平均，且永續性數值達到 0.98 以上；熱區內之水子系統歷年永續性都大於桃園市整體平均，且熱區內永續性在平均永續性持續降低之際持續上升，永續性由 0.8086 上升至 0.9519。綜合探討熱區內各子系統之永續性，能源子系統與水子系統永續性顯著大於整體，顯示 ES 热區與能源子系統、水子系統高永續性區域高度重疊。

表 16、2007 年、2014 年、2021ES 热區與桃園市永續性

		糧食子系統	能源子系統	水子系統
2007 年	桃園市	0.3043	0.7354	0.4805
	熱區	0.3397	0.9895	0.8086
2014 年	桃園市	0.2617	0.7080	0.4474
	熱區	0.1957	0.9898	0.8083
2021 年	桃園市	0.1972	0.7293	0.3271
	熱區	0.1882	0.9804	0.9519

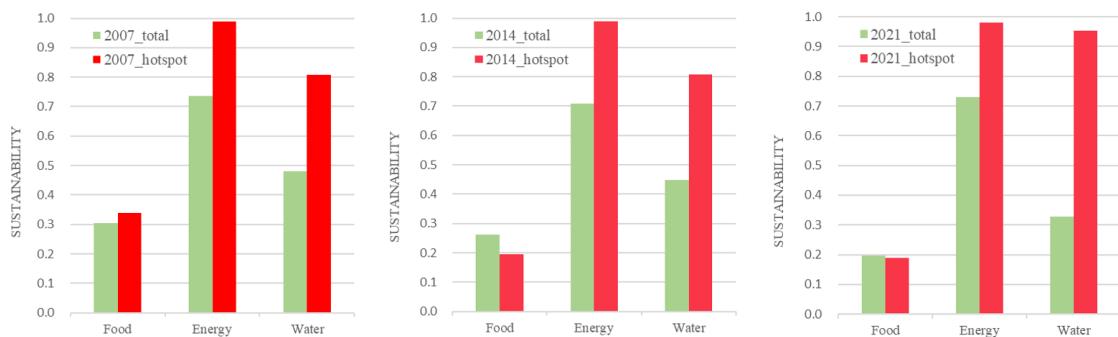


圖 40、2007 年、2014 年、2021 ES 热區內外之永續性比較



#### 4.2.4 FEW 永續性權衡關係

表 17 展現 FEW Nexus 間永續性之 Pearson 係數，糧食子系統與其餘子系統之相關性皆呈現競合，其中又與水子系統較為顯著，糧食子系統與水子系統之相關性從 2007 年之 -0.3，逐步上升至 2021 年之 -0.184，顯示糧食子系統與水子系統之競合關係降低；另一方面，能源子系統與水子系統間之協同性隨時間提升，由 2007 年之 0.206 上升至 2021 年之 0.293。

表 17、2007 年、2014 年、2021 永續性指標之相關係數

		糧食子系統	能源子系統	水子系統
		糧食子系統	1.000	
2007 年	能源子系統	-0.099	1.000	
	水子系統	-0.300	0.206	1.000
		糧食子系統	1.000	
2014 年	能源子系統	-0.229	1.000	
	水子系統	-0.241	0.275	1.000
		糧食子系統	1.0007	
2021 年	能源子系統	-0.140	1.000	
	水子系統	-0.184	0.293	1.000

進一步探討 FEW Nexus 關係，本研究比較 FEW 子系統 永續性指標間之 Pearson 相關係數，並參考過去研究將 Pearson 相關係數大於 0.5 設為協同，Pearson 相關係數小於-0.5 設為競合，其餘則歸類於未分類。

圖 41、圖 42 與圖 43 分別代表 2007 年、2014 年及 2021 年 FEW Nexus 關係，W-E 代表水子系統與能源子系統間之鏈結關係，W-F 代表水子系統和糧食子系統間之鏈結關係，F-E 代表糧食子系統和能源子系統間之鏈結關係。

2007 年綜合三個子系統中之權衡關係 67%屬於未分類、21%屬於協同，剩餘



12% 則為競合，歷年 FEW Nexus 未分類比例皆為最大，顯示 FEW 內部指標變化趨勢並不一致，此結果與過去之研究相符(Hao et al., 2022; Song et al., 2023)；未分類比例隨時間逐漸下降至 2021 年之 59%，取而代之是協同與競合比例上升，在 2021 年協同與競合比例分別上升至 29% 及 12%。

一步觀察 FEW 各子系統間之鏈結關係，能源子系統與其他子系統鏈結關係之競合都非常低，其中水與能源鏈結 (W-E) 之權衡比例歷年皆為 0，未分類比例卻高達 70% 以上，展現能源子系統僅能提供其他子系統有限支持(Song et al., 2023)。

在水子系統與其他子系統之關係中，水與糧食鏈結 (W-F) 之競合比例最高，由 2007 年之 24% 上升至 2021 年之 31%，W-F 之協同比例也逐步上升，說明水子系統與糧食子系統呈現協同、競合兩極化趨勢，競合起因於水資源在氣候變遷下供給穩定性下降，桃園市種植耗水而經濟價值較低之糧食作物，讓農業用水約佔水資源使用量之 60%，GDP 總值卻僅佔約 2%，無法進一步提高水資源利用效率；協同可能源自於政府緩解水資源短缺壓力、鼓勵糧食耕作量之措施。

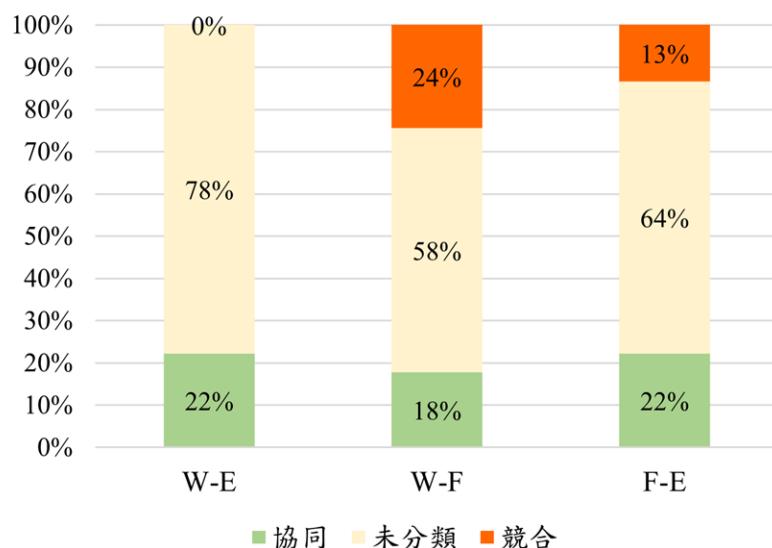


圖 41、2007 年 FEW 指標間權衡關係（協同、未分類和競合）之百分比

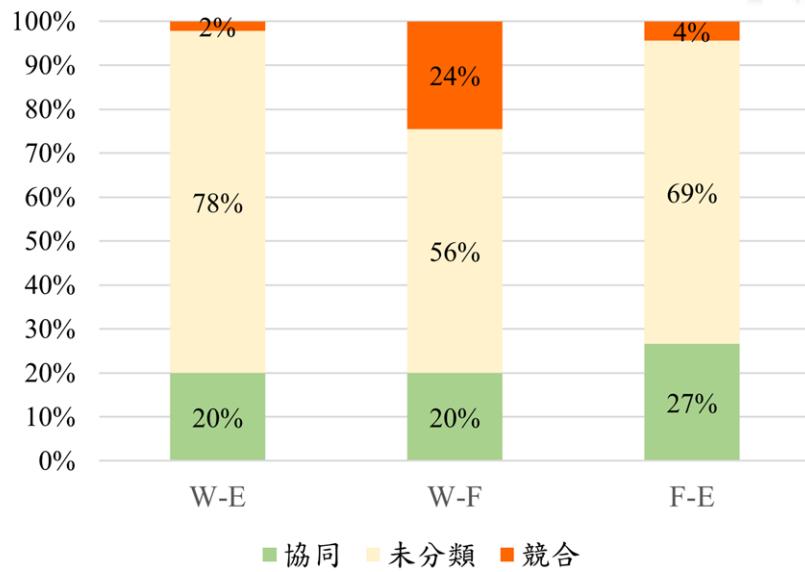


圖 42、2014 年 FEW 指標間權衡關係（協同、未分類和競合）之百分比

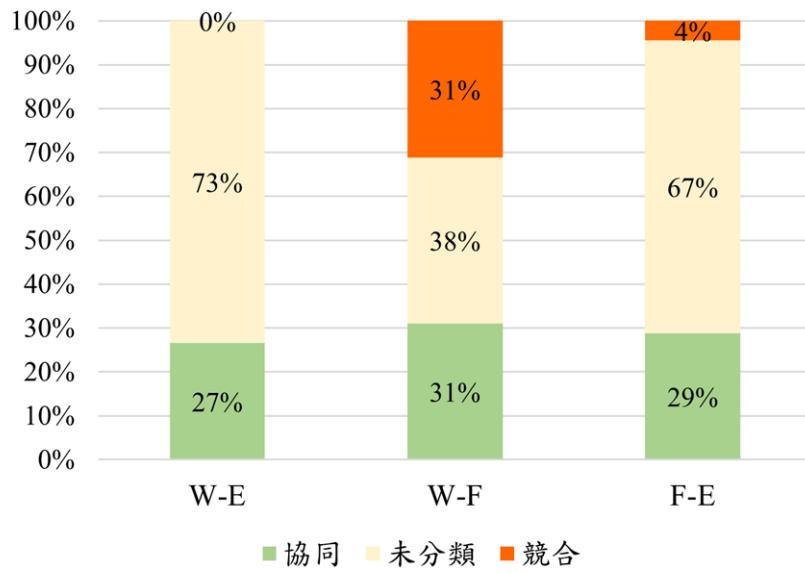


圖 43、2021 年 FEW 指標間權衡關係（協同、未分類和競合）之百分比



#### 4.2.5 FEW 永續性權衡關係討論

本研究使用歷年之協同、未分類和權衡之比較，可以更好了解 FEW Nexus 變化。本研究 W-E 權衡比例歷年皆為 0，未分類比例也高達 70%以上，其餘則皆為協同。Hao et al. (2022)中吉爾吉斯斯坦 W-E 表現出未分類之關係，表明能源子系統無法為水子系統提供足夠支持，吉爾吉斯斯坦之水力發電潛力巨大，電力供應超過 80%為水力發電，然而化石燃料含量為中亞最低，供電穩定受到再生能源影響甚鉅，同時因工商業不發達，單位 GDP 能源使用率與單位人口能源產量偏低，造成協同和權衡比例相當。

桃園市超過 99%之燃料從國外進口，能源自主性較不足，不過石門水庫水力年發電超過 3 億度，約佔全台灣水力發電供應 35%，且工業單位 GDP 之耗能低，能源人均供應量充足，促使歷年桃園市 W-E 權衡皆為 0。能源結構佔比調整也可以增加 W-E 永續性，桃園市具有數千口埤塘，在池塘水面設置漂浮型太陽能板，可提高太陽能發電之發電比率，將緩解能源資源之壓力。(Song et al., 2023)

本研究指出水 W-F 存在著強大之競合關係，與 Hao et al. (2022)山多平原少國家之結果相同，過去研究指出吉爾吉斯斯坦與塔吉克斯坦之耕地面積總體佔比低，擁有豐富之水資源，有限土地資源將限制水資源之充分利用，同時土地資源與糧食子系統間緊密之關係，將導致糧食子系統永續性受到挑戰。

桃園市同為多台地丘陵之地形，水資源之最大化利用受限導致 W-F 存在權衡關係，尤其隨著時間推移，桃園耕地面積占由 2007 年之 28%下降至 2021 年之 25%，顯示 W-F 權衡情形將日漸加劇，這與本研究之結果不謀而合。相反 W-F 也可能存在強大之協同關係，Song et al. (2023)中烏茲別克因農業種植結構調整，提升種植高經濟作物比例，有效改善農作物提供之 GDP，進一步提高水資源利用效率，另外若能提高單位農地之作物產量，亦可緩解水資源和糧食自給不足之壓力(Qin et al., 2022)。

本研究將糧食限制在稻米和甘薯，低估桃園市農業轉型下之 W-F 關係，近年桃園市積極推動「小而美和小而強」之農業，鼓勵農民轉作耐旱低耗水作物，同時訂定有機農業發展自治條例，鼓勵農民種植有機農業，提升桃園市糧食自給率，



緩解水資源短缺導致之壓力。

本研究結果顯示 W-E 之結果相似，未分類依然是 F-E 關係主要組成，而 W-E 中協同之佔比遠高於權衡。能源結構佔比調整可以增加 W-E 永續性(Song et al., 2023)，桃園市具有數千口埤塘，在池塘水面設置漂浮型太陽能板，可提高太陽能發電之發電比率，將緩解能源資源之壓力。



## 4.3 永續性與生態系服務之關係評估

### 4.3.1 耦合協調度結果

本研究將桃園市 13 個行政區永續性與各項 ES 之 CCD 進行分類，並繪製各行政區空間分佈。圖 44 顯示糧食生產與 FEW 永續性之 CCD 空間分佈，新屋、楊梅及大園在歷年皆維持協調，其中新屋近年來為高度協調，顯示新屋為糧食生產集中區，另一方面山勢起伏區和都會區則呈現高度不協調。圖 45 展示沉積物保留與 FEW 永續性之 CCD 分佈，2007 年位處桃園台地行政區皆為高度不協調，較靠近內陸之龍潭、龜山、大溪則呈現輕度協調或輕度不協調，僅復興區為高度協調狀態；圖 46 呈現碳儲存 CCD 之分佈，復興歷年皆維持高度協調，展現森林碳儲存高之土地利用特性，相反中壢、桃園、八德、平鎮處於高度不協調狀態，其餘則為輕度不協調與輕度協調佔多數。

都市降溫與 FEW 永續性 CCD 分佈如圖 47 所示，可見都市區域處於高度不協調狀態，範圍由原先集中於桃園與八德，隨著都市擴張至周遭區域，2021 年除農業區之新屋與森林區之復興，其餘行政區皆處於不協調，顯示整體都市降溫與永續性之 CCD 日益降低。至 2021 年桃園市整體沉積物保留與永續性 CCD 急遽降低，各行政區皆為高度不協調，僅復興及大溪成為唯二的例外。

由圖 48 可知營養鹽保留與 FEW 永續性之 CCD 歷年分佈較不固定，2007 年不協調狀態之行政區較少，2014 年呈現不協調行政區擴張至整個桃園台地上，而 2021 年農業區之 CCD 較往年提升，相反森林區之 CCD 却降低。由圖 49 可見產水量與 FEW 永續性之 CCD，2007 年與 2021 年之高度不協調區域主要集中在桃園台地上，復興為高度協調區域，然而 2014 年 CCD 整體扭轉，桃園、八德、平鎮等桃園台地上都會區之 CCD 為全桃園市最高，由於產水量深受降雨量影響，因此推測是降雨量間接影響 2014 年之 CCD 空間分佈。

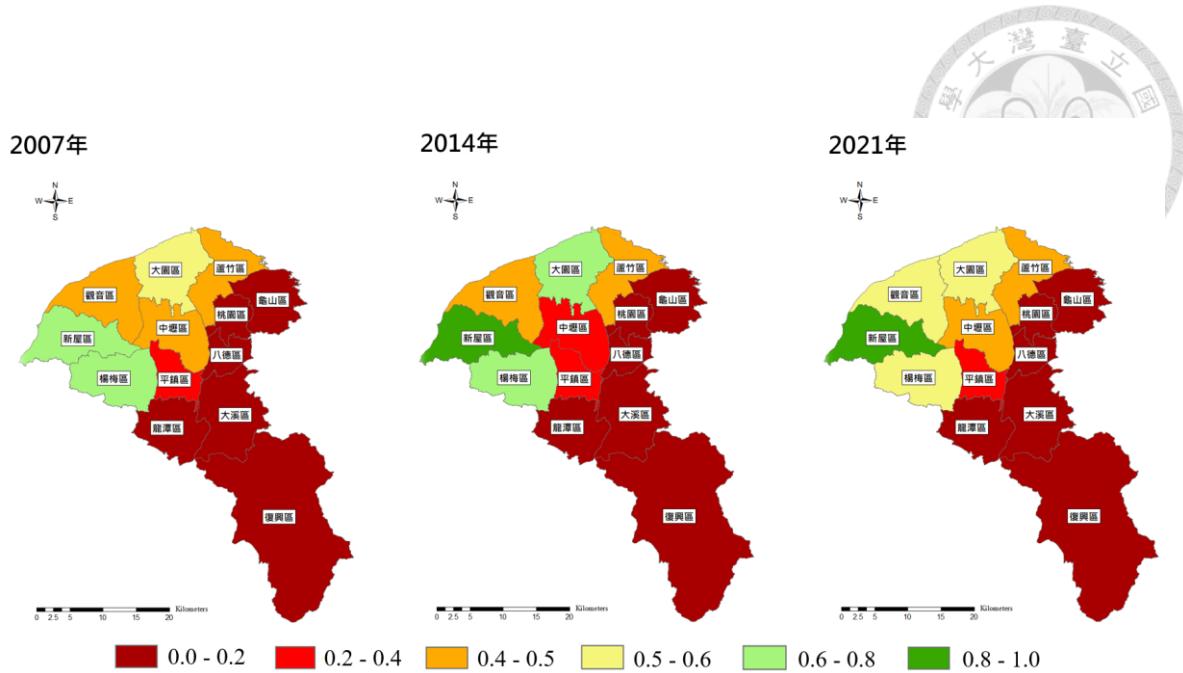


圖 44、2007 年、2014 年、2021 年糧食生產與 FEW 永續性之協調度

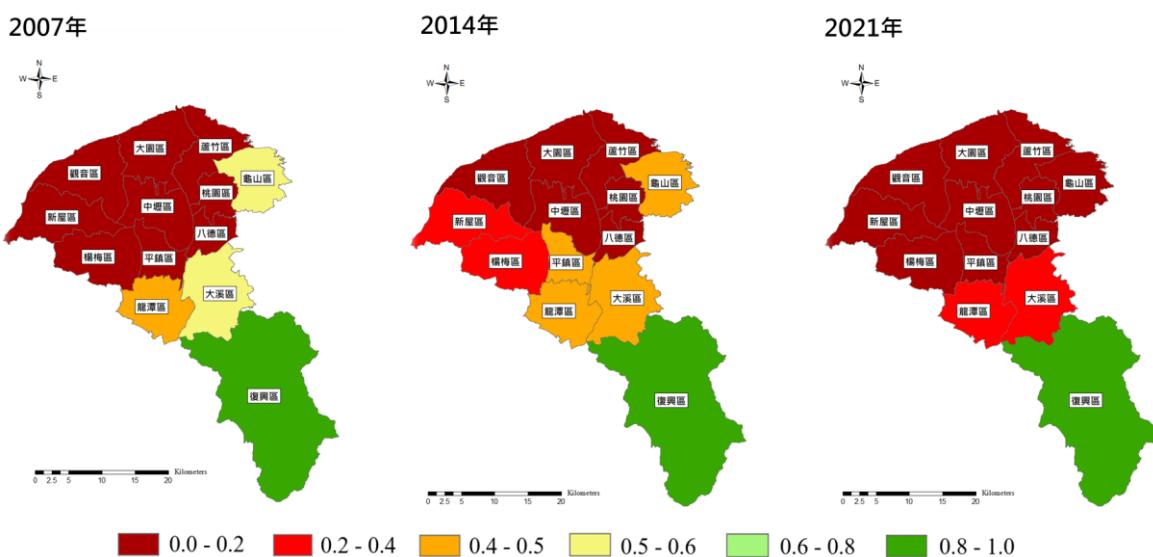
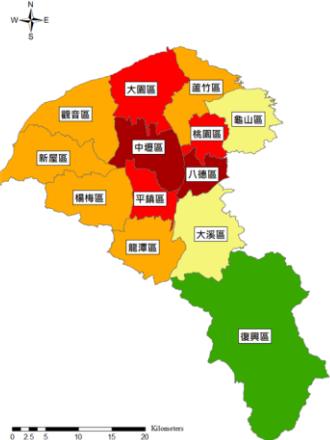
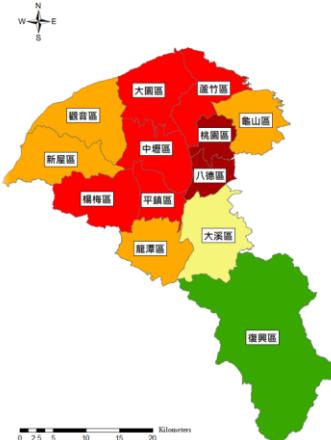


圖 45、2007 年、2014 年、2021 年沉積物保留與 FEW 永續性之協調度

2007年



2014年



2021年

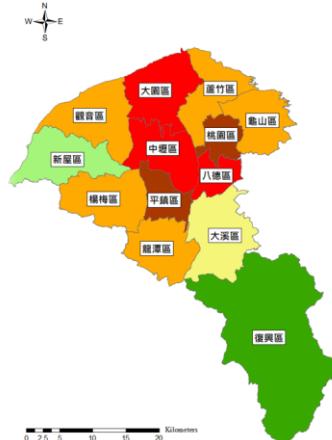
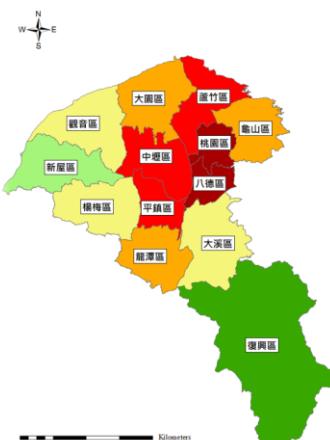
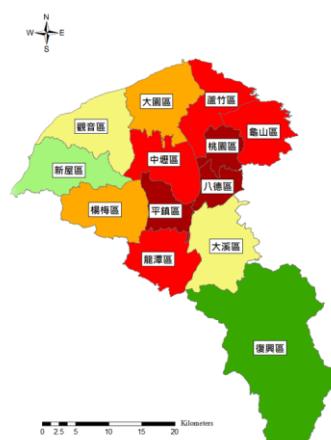


圖 46、2007 年、2014 年、2021 年碳儲存與 FEW 永續性之協調度

2007年



2014年



2021年



圖 47、2007 年、2014 年、2021 年都市降溫與 FEW 永續性之協調度

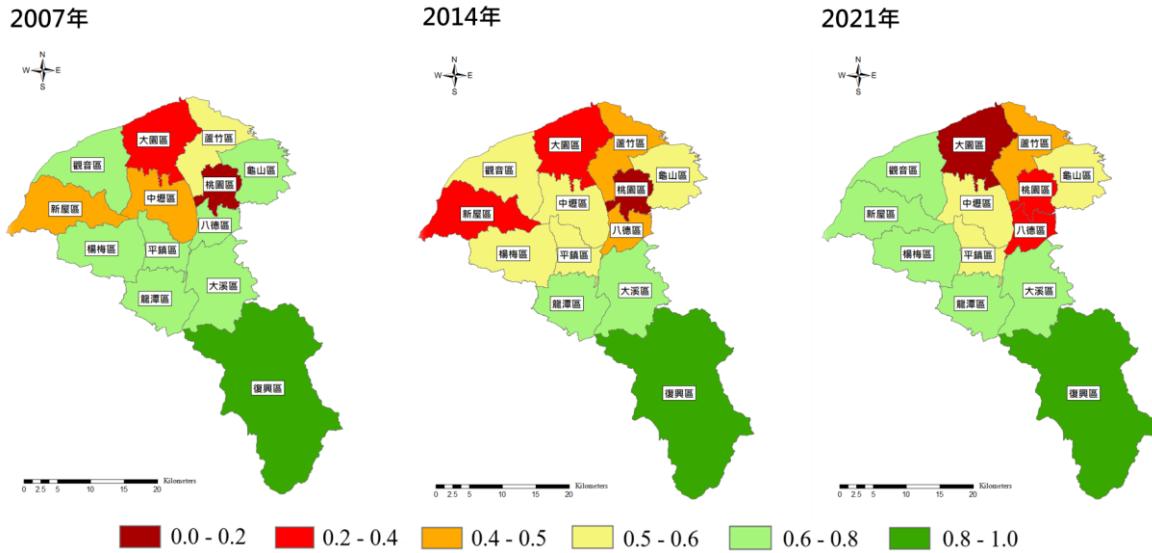


圖 48、2007 年、2014 年、2021 年營養鹽保留與 FEW 永續性之協調度

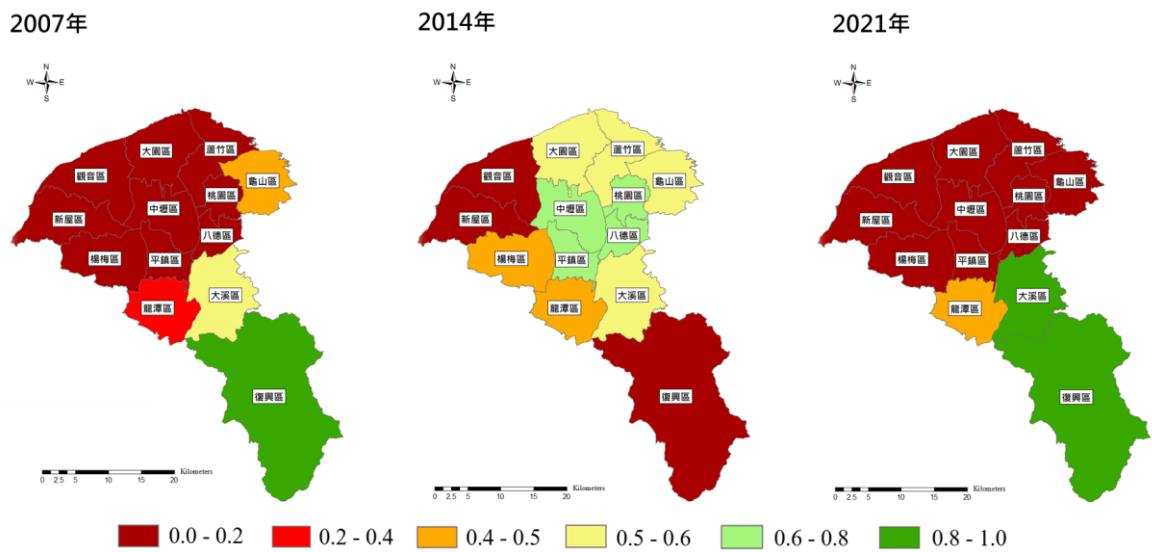


圖 49、2007 年、2014 年、2021 年產水量與 FEW 永續性之協調度

#### 4.3.2 耦合協調度討論

針對糧食生產與 FEW 永續性間之協調關係討論，本研究西部農業區呈現協調狀態，東部、南部都市及森林區則呈現不協調狀態，由於糧食子系統永續性與糧食



產量呈現顯著相關性，因此糧食產量高之新屋區 CCD 位處高值，相反糧食生產低之行政區 CCD 則處於高度不協調 (Ding, Fang, et al., 2023)。

探討碳儲存與 FEW 永續性間之 CCD 結果，發現本研究北部城市人口集中區呈現不協調狀態，南部森林區則歷年維持協調；沉積物保留與永續性 CCD 分布與碳儲存的分布類似，不過北部不協調區域擴張至整個桃園台地，南部協調區域也縮少至僅剩復興區。根據表 18、表 19 與表 20 之相關性結果，顯示碳儲量與土壤保留能力與水子系統永續性具顯著協同，因此水子系統永續性高的復興區之 CCD 才會遙遙領先其他行政區(Ding, Fang, et al., 2023)。

復興區高永續性源自森林區完善 ES 供給，大量植被覆蓋提供多種 ES，其中包含碳儲存與土壤保持，相比之下桃園台地之植被覆蓋度低，且近年快速人為開發促使 ES 減少，進而導致 FEW 永續性與 ES 間之 CCD 持續下降。過去研究杭州市政府實施環境功能、生態城市建設之相關規劃，改善杭州永續性與 ES 之 CCD(Ding & Chen, 2023)；近年桃園市政府推動「桃園生態城市造林計畫」，與企業合作執行公益植樹，增加桃園市都會區植樹造林工作，進而提升都會區永續性。

桃園市 FEW 永續性與產水量 CCD 在不同年份中變動，2007 年、2021 年高度不協調區域主要集中在桃園台地上，2014 年高度不協調區域則改變為農業區與森林區。本研究進一步探討產水量與 FEW 永續性 CCD 的變動原因，認為降雨量、蒸發散量等氣候因素是主要造成 CCD 變動的重要因素，過去研究認為氣候因子與產水量呈現顯著協同(Yixin Wang et al., 2022; Yang et al., 2022)，因此當 2014 年降雨空間分佈與往年不同，產水量之空間分佈也會改變，影響水子系統永續性，最終導致產水量與永續性之 CCD 受到影響。

桃園市高度協調區域與高 ES 區域空間分佈呈高度相似，同時 2007 至 2021 年間桃園市 ES 普遍下降，因而導致 CCD 降低，顯示 CCD 與 ES 空間變化具高度一致性。另一方面結果 ES 對 CCD 影響程度較高，高 ES 區域即使 FEW 永續性低，CCD 數值也表現高度協調度，顯示改善 ES 能強化 FEW 永續性與 ES 間協調關係之重要性。



### 4.3.3 權衡關係結果

與表 17 的相關性計算方法相同，表 18、表 19 與表 20 也使用 Pearson 相關係數衡量權衡關係，研究區域中三項子系統與六種 ES 除計算權衡關係，同時計算 p 值在不同檢驗條件中是否顯著，\* 代表輕度顯著 ( $p < 0.05$ )，以 \*\* 代表中度顯著 ( $p < 0.01$ ) 時為顯著，以 \*\*\* 代表高度顯著 ( $p < 0.001$ )。

糧食子系統永續性歷年皆與糧食生產呈高度顯著，相關係數歷年皆大於 0.8，屬於高度協同關係，其餘 ES 與糧食子系統永續性間無固定權衡與顯著關係。能源子系統與沉積物保留、產水量歷年皆中度協同，糧食生產、營養鹽保留與能源子系統之競合關係則隨時間增加，顯著性方面六項 ES 與能源子系統皆無顯著關係。

水子系統永續性歷年與碳儲存、沉積物保留間存在高度顯著與高度協同關係，其中水子系統永續性與沉積物保留間之協同關係則隨時間持續增強；永續性與產水量權衡與顯著性歷年變動劇烈，在 2007 年、2021 年之相關性分別達到 0.894 和 0.929，呈現高度顯著協同，不過 2014 年時相關性卻急遽下降至 -0.404，由高度協同改變為中度競合狀態；水子系統與糧食在 2007 至 2021 年為不具顯著性之中度或輕度競合關係。

表 18、2007 年 FEW 永續性與 ES 之權衡關係

2007 年	Food	Energy	Water
糧食生產	0.826***	-0.072	-0.441
沉積物保留	-0.108	0.372	0.883***
碳儲存	0.020	0.301	0.853***
都市降溫	0.426	0.165	0.659*
營養鹽保留	-0.255	0.016	0.584*
產水量	-0.043	0.413	0.894***

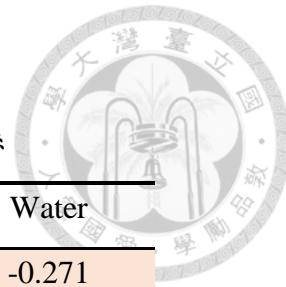


表 19、2014 年 FEW 永續性與 ES 之權衡關係

2014 年	Food	Energy	Water
糧食生產	0.825***	-0.107	-0.271
沉積物保留	-0.144	0.413	0.973***
碳儲存	-0.146	0.340	0.944***
都市降溫	0.279	0.173	0.821***
營養鹽保留	-0.384	-0.018	0.674*
產水量	-0.548	0.354	-0.404

表 20、2021 年 FEW 永續性與 ES 之權衡關係

2021 年	Food	Energy	Water
糧食生產	0.802***	-0.275	-0.299
沉積物保留	-0.052	0.370	0.982***
碳儲存	0.140	0.177	0.851***
都市降溫	0.392	0.177	0.797**
營養鹽保留	0.001	-0.241	0.368
產水量	-0.087	0.424	0.929***

#### 4.3.4 權衡關係討論

FEW 永續性與 ES 間之相關性取決於當地生態環境狀態與發展方向，永續發展主要由城市化、工業化等人類活動引起。正相關代表 ES 促進永續性之提升，永續發展帶來之資本投入可提高 ES，產生正回饋之效應，負相關則為負回饋效應展現，ES 惡化阻礙永續發展，進而使 ES 缺乏管理維持而降低(Yang et al., 2022)。

本研究糧食子系統之永續性歷年皆與糧食生產呈現極顯著協同，主要是因為糧



食子系統永續性對糧食生產具正向影響，正向永續性指標如糧食種植面積、人均糧食種植產量等影響之下，使永續性與糧食生產間產生協同性(Ding, Chen, et al., 2023; Ding, Fang, et al., 2023)。相關性結果除糧食生產之外，糧食子系統永續性僅與都市降溫呈現協同，這起因於熱調適指數與土地利用的高度相關，糧食種植面積大致與土地利用型態中之農地相同，而造成協同結果。

土地利用與溫度分布之複雜性，也導致其與都市降溫間之協同狀態並不顯著，與過去研究結果相似，且本研究觀察除糧食生產外，糧食子系統與各項 ES 幾乎無顯著相關性。Ding, Fang, et al. (2023)指出糧食子系統永續性與產水量、碳儲存等 ES 自 2000 年到 2020 年相關性皆為不顯著，Ding, Chen, et al. (2023)得出糧食子系統與產水量、土壤保持力皆無相關性，僅碳儲存因過量氮肥增加溫室氣體排放而影響土壤有機碳之累積。

能源子系統永續性與 ES 無論呈現正競合性，歷年檢驗顯著性結果皆為不顯著，能源自給率低地區之研究發現相似結果(Ding, Fang, et al., 2023; Yuan & Lo, 2020)。然而其他主要能源自給率高則地區之研究提出不同看法，van den Heuvel et al. (2020); (Yuan & Lo, 2020)提到人類能源活動大幅影響土地利用變化，再生能源基礎設施發展將導致土地利用改變，促使糧食產量下降，近年大量農地轉成建地，能源子系統與糧食生產間因而產生競合關係；過去研究認為能源活動也對地球循環產生衝擊，Ding, Chen, et al. (2023)指出能源子系統永續性指標 - 碳強度與產水量、沉積物保留具協同，起因可能為燃料生產造成土壤物理性質改變，土地碳儲存能力下降所致。台灣能源供應高度仰賴外國進口，桃園市之人類能源活動對環境影響較有限，因此能源子系統永續性與 ES 之間並無顯著相關性。

本研究水子系統永續性與 ES 相關性，研究結果與過去研究一致，水子系統永續性歷年皆與沉積物保留、碳儲存呈協同，與糧食生產則為競合，然而在社會經濟快速發展下，水資源快速消耗同時增加碳排放，對碳儲存造成巨大壓力，工業部門用水量增加，排擠農業灌溉的水資源，因此對糧食生產造成負面影響(Ding, Chen, et al., 2023; Ding, Fang, et al., 2023)。水子系統永續性與產水量之相關性在不同年份有所變動，與本研究永續性與產水量 CCD 結果相似，氣候因子分布改變使相關性由



顯著協同變成競合。

各城市 ES 與 FEW 永續性之關係，主要由 ES 與 FEW 永續性指標迴歸情形控制，因此在進行城市案例分析時，需考慮到不同城市在社會經濟發展、自然資源與生態環境方面存在差異，將各子系統永續性指標根據不同城市現狀適當調整，後續結果相關性會因應研究區不同而產生不同結果。



## 第五章 、結論與建議

### 5.1 結論

本研究利用 InVEST 模型量化 ES，探討糧食生產、碳儲存、都市降溫、沉積物遞移、營養鹽遞移、產水量六項 ES，在桃園市過去及現今之分布與熱區；另一方面計算 FEW 永續性指標，探討 FEW 永續性及其連結關係，透過 FEW 永續性與 ES 間之空間分布與相關性比較，將 ES 與 FEW 永續性概念結合，本研究結論如下：

1. 本研究將 ES 綜合熱區定義為熱區疊加數量多於四種 ES 之區域，根據 ES 歷年之疊加結果，2007 年桃園市熱區佔全市面積之 23.5%，2021 年桃園市熱區佔全市之 22.34%，然而 2014 年僅佔整體面積之 6.44%，起因於降雨分布改變而使產水量分佈轉移所致。探討 ES 热區內之 FEW 永續性狀況，發現能源子系統與水子系統永續性顯著大於整體 FEW 永續性，熱區內糧食子系統永續性則歷年幾乎皆小於 FEW 平均永續性。
2. 綜合歷年 ES 間權衡關係，碳儲存、沉積物保留、都市降溫間具高度協同關係；糧食生產歷年與多數 ES 呈競合；產水量易受降水空間分布影響，導致權衡關係由協同變為競合。ES 間權衡關係，排除降水空間導致之產水量空間變化，整體權衡關係基本相同，然而 Pearson 相關係數呈下降趨勢，顯示 ES 間競合關係逐漸增強。
3. 粮食子系統永續性主要集中農業區與森林區，高能源子系統永續性區域主要為森林區與都會區，水子系統永續性主要集中工業區與森林區。糧食子系統永續性與水子系統永續性呈現下降趨勢，尤其在 2007 年至 2014 年間有明顯之降幅，從 2007 年之 0.455 下降到 2021 年之 0.357，而能源子系統永續性指數基本持平。
4. 歷年 FEW 永續性指標間未分類比例皆為最高，顯示 FEW Nexus 內指標變化趨勢不一致。糧食子系統與其餘子系統皆呈現競合關係，其中 W-F 較為顯著，不過 W-F 競合關係隨時間逐漸降低；另一方面，W-E 之協同關係隨時間提升。W-E 與 F-E 之競合比例很低，不過未分類比例卻高達 70% 以上，展現能源子系



統僅能提供其他子系統有限支持；水子系統方面，W-F 競合比例最高，然而 W-F 協同比例也逐步上升，說明 W-F 呈現協同、競合兩極化趨勢。

5. 本研究利用 CCD 觀察桃園市 FEW 永續性與 ES 空間分佈，糧食生產桃園市西部農業區呈現協調，其餘則呈現不協調；碳儲存、沉積物保留、都市降溫與營養鹽保留空間分布類似，桃園市北部城市人口集中區呈現不協調狀態，南部森林區則歷年維持協調；產水量 CCD 在不同年份進行變動，高度不協調區域主要集中在桃園台地上。
6. FEW 永續性與 ES 間存在權衡關係。糧食子系統永續性歷年皆與糧食生產呈高度顯著、高度協同關係。能源子系統與六項 ES 與能源子系統皆不顯著，推測能源子系統永續性與能源仰賴進口有所關聯。水子系統永續性歷年與碳儲存、沉積物保留間存在高度顯著與高度協同關係；FEW 永續性與產水量權衡關係與顯著性歷年變動劇烈，推測是降雨量空間分佈改變之影響。



## 5.2 建議

根據本研究執行之過程及結果討論，整理以下對未來相關研究之建議：

1. 不同模式比較 ES：本研究使用 InVEST 量化 ES，其中無論是參數設定或資料來源皆會產生誤差，建議以 SWAT、ARIES 等其他 ES 模型進行比較，增加 ES 量化結果之可信度與準確性。
2. FEW 永續性指標選取與資料來源：考慮永續性資料可用性與缺失情況，建議將永續性指標資料進行驗證，同時建構更全面之評估指標體系，納入更多反映 FEW Nexus 交互作用之指標，以更全面地評估 FEW Nexus 間相互作用。
3. ES 供需關係：本研究對於 ES 分析著重於供給面，尚未討論到人類對於 ES 之需求，建議未來研究可將焦點擴展到 ES 之供需關係，從需求的角度探討資源管理和配置，以更全面地考慮人類活動對生態系統的影響。
4. FEW 永續性指標的廣泛應用：本研究依據過去研究將 FEW 分別對應六項 ES，建議可考慮更多元的永續性指標，以確保 FEW 永續性維持與改善，並進一步探討不同指標對於 FEW 永續性之代表性。
5. 閾值的確定：未來研究應針對 CCD 與 Pearson 相關係數閾值進行探討驗證，以確保適用性與準確性，進而更有效評估 FEW 永續性與 ES 間之權衡關係。
6. 驅動因素的研究：對於促進 FEW 永續性和多重 ES 間協調作用之驅動因素，本研究僅探討其相關性，並僅觀察降雨空間分布，未來可進行更深入的研究，以揭示系統整合管理的關鍵因素。

這些建議將有助於未來相關研究更深入地探索 ES 與 FEW 永續性之間之關係，並提出更具體的政策建議和管理措施。

## 參考文獻



- "Eggleston, H. S., "Buendia, L., "Miwa, K., "Ngara, T., & "Tanabe, K. (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. ; IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme, Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, c/o Institute for Global Environmental Strategies IGES, 2108 - 11, Kamiyamaguchi, Hayama, Kanagawa (Japan). <https://doi.org/https://doi.org/> Other: ISBN 4-88788-032-4; TRN: JP07CC058 NLC
- Abulibdeh, A., & Zaidan, E. (2020). Managing the water-energy-food nexus on an integrated geographical scale. *Environmental Development*, 33, 100498. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envdev.2020.100498>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration- Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *Fao, Rome*, 300(9), D05109.
- ARCGIS\_PRO3.2\_handbook. *An overview of the Spatial Statistics toolbox*. ARCGIS PRO3.2. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-statistics/an-overview-of-the-spatial-statistics-toolbox.htm>
- Artioli, F., Acuto, M., & McArthur, J. (2017). The water-energy-food nexus: An integration agenda and implications for urban governance. *Political Geography*, 61, 215-223. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.polgeo.2017.08.009>
- Bahri, M. A. S., Sabri, S., Johar, F., Kararbassi, Z., Majid, M. R., & Ludin, A. N. M. (2014). Comparison of Spatial Autocorrelation Analysis Methods for Distribution Pattern of Diabetes Type II Patients in Iskandar Malaysia Neighbourhoods. International Conference on Urban and Regional Planning; Universiti Teknologi Malaysia: Johor Bahru, Malaysia,
- Bian, Z., & Liu, D. (2021). A Comprehensive Review on Types, Methods and Different Regions Related to Water–Energy–Food Nexus. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(16), 8276. <https://www.mdpi.com/1660-4601/18/16/8276>
- Carvalho, P. N., Finger, D. C., Masi, F., Cipolletta, G., Oral, H. V., Tóth, A., Regelsberger, M., & Exposito, A. (2022). Nature-based solutions addressing the



- water-energy-food nexus: Review of theoretical concepts and urban case studies. *Journal of Cleaner Production*, 338, 130652.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130652>
- Chaudhary, A., Gustafson, D., & Mathys, A. (2018). Multi-indicator sustainability assessment of global food systems. *Nature Communications*, 9(1), 848.  
<https://doi.org/10.1038/s41467-018-03308-7>
- Chen, T.-T., Hsu, W.-L., & Chen, W.-K. (2020). An Assessment of Water Resources in the Taiwan Strait Island Using the Water Poverty Index. *Sustainability*, 12(6), 2351.  
<https://www.mdpi.com/2071-1050/12/6/2351>
- Ding, T., & Chen, J. (2023). Evaluating supply-demand matching of ecosystem services considering water-energy-food nexus and synergies/trade-offs in the Hangzhou of China. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(19), 54568-54585.
- Ding, T., Chen, J., Fang, L., Ji, J., & Fang, Z. (2023). Urban ecosystem services supply-demand assessment from the perspective of the water-energy-food nexus. *Sustainable Cities and Society*, 90, 104401.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104401>
- Ding, T., Chen, J., Fang, Z., & Chen, J. (2021). Assessment of coordinative relationship between comprehensive ecosystem service and urbanization: A case study of Yangtze River Delta urban Agglomerations, China. *Ecological Indicators*, 133, 108454.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108454>
- Ding, T., Fang, L., Chen, J., Ji, J., & Fang, Z. (2023). Exploring the relationship between water-energy-food nexus sustainability and multiple ecosystem services at the urban agglomeration scale. *Sustainable Production and Consumption*, 35, 184-200.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.10.028>
- Dou, H., Li, X., Li, S., Dang, D., Li, X., Lyu, X., Li, M., & Liu, S. (2020). Mapping ecosystem services bundles for analyzing spatial trade-offs in inner Mongolia, China. *Journal of Cleaner Production*, 256, 120444.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120444>
- Droogers, P., & Allen, R. G. (2002). Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. *Irrigation and drainage systems*, 16, 33-45.
- Endo, A., Tsurita, I., Burnett, K., & Orencio, P. M. (2017). A review of the current state of



- research on the water, energy, and food nexus. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 11, 20-30. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.11.010>
- Fang, Z., Chen, J., Liu, G., Wang, H., Alatalo, J. M., Yang, Z., Mu, E., & Bai, Y. (2021). Framework of basin eco-compensation standard valuation for cross-regional water supply – A case study in northern China. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123630. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123630>
- Hanes, R. J., Gopalakrishnan, V., & Bakshi, B. R. (2018). Including nature in the food-energy-water nexus can improve sustainability across multiple ecosystem services. *Resources, Conservation and Recycling*, 137, 214-228. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.06.003>
- Hao, L., Wang, P., Yu, J., & Ruan, H. (2022). An integrative analytical framework of water-energy-food security for sustainable development at the country scale: A case study of five Central Asian countries. *Journal of Hydrology*, 607, 127530. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127530>
- Hou, L., Wu, F., & Xie, X. (2020). The spatial characteristics and relationships between landscape pattern and ecosystem service value along an urban-rural gradient in Xi'an city, China. *Ecological Indicators*, 108, 105720. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105720>
- Hou, X., Lv, T., Xu, J., Deng, X., Liu, F., & Pi, D. (2021). Energy sustainability evaluation of 30 provinces in China using the improved entropy weight-cloud model. *Ecological Indicators*, 126, 107657. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107657>
- Hou, Y., Li, B., Müller, F., Fu, Q., & Chen, W. (2018). A conservation decision-making framework based on ecosystem service hotspot and interaction analyses on multiple scales. *Science of The Total Environment*, 643, 277-291. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.103>
- Hou, Y., Lü, Y., Chen, W., & Fu, B. (2017). Temporal variation and spatial scale dependency of ecosystem service interactions: a case study on the central Loess Plateau of China. *Landscape Ecology*, 32, 1201-1217.
- Hu, X., Ma, C., Huang, P., & Guo, X. (2021). Ecological vulnerability assessment based on AHP-PSR method and analysis of its single parameter sensitivity and spatial



autocorrelation for ecological protection—A case of Weifang City, China. *Ecological Indicators*, 125, 107464.

Ji, J., Wang, L., Xie, M., Lv, W., Yu, C., Liu, W., & Shifaw, E. (2023). Evaluation of Coupling Coordination Degree between Economy and Eco-Environment Systems in the Yangtze River Delta from 2000 to 2020. *Systems*, 11(10), 500.  
<https://www.mdpi.com/2079-8954/11/10/500>

Jia, Z., Cai, Y., Chen, Y., & Zeng, W. (2018). Regionalization of water environmental carrying capacity for supporting the sustainable water resources management and development in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 134, 282-293.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.03.030>

Karabulut, A. A., Udiás, A., & Vigiak, O. (2019). Assessing the policy scenarios for the Ecosystem Water Food Energy (EWFE) nexus in the Mediterranean region. *Ecosystem Services*, 35, 231-240.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2018.12.013>

Kasztelan, A., & Nowak, A. (2021). Construction and Empirical Verification of the Agri-Environmental Index (AEI) as a Tool for Assessing the Green Performance of Agriculture. *Energies*, 14(1), 45. <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/1/45>

Legendre, P., & Fortin, M. J. (1989). Spatial pattern and ecological analysis. *Vegetatio*, 80, 107-138.

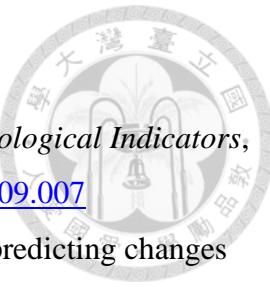
Li, W., Wang, Y., Xie, S., & Cheng, X. (2021). Coupling coordination analysis and spatiotemporal heterogeneity between urbanization and ecosystem health in Chongqing municipality, China. *Science of The Total Environment*, 791, 148311.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148311>

Li, Y., Zhan, J., Liu, Y., Zhang, F., & Zhang, M. (2018). Response of ecosystem services to land use and cover change: A case study in Chengdu City. *Resources, Conservation and Recycling*, 132, 291-300.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.03.009>

Liangshi, Z., Sijia, L. I. U., & Caizhi, S. U. N. (2021). Study on coupling and coordinated development of water-energy-food security system in the Yellow River Basin. *Water Resources Protection*, 37(1), 69-78. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.01.010>

Lin, S., Wu, R., Yang, F., Wang, J., & Wu, W. (2018). Spatial trade-offs and synergies



- among ecosystem services within a global biodiversity hotspot. *Ecological Indicators*, 84, 371-381. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.09.007>
- Liu, Y., Hou, X., Li, X., Song, B., & Wang, C. (2020). Assessing and predicting changes in ecosystem service values based on land use/cover change in the Bohai Rim coastal zone. *Ecological Indicators*, 111, 106004. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.106004>
- Lorilla, R. S., Poirazidis, K., Kalogirou, S., Detsis, V., & Martinis, A. (2018). Assessment of the Spatial Dynamics and Interactions among Multiple Ecosystem Services to Promote Effective Policy Making across Mediterranean Island Landscapes. *Sustainability*, 10(9), 3285. <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/9/3285>
- Lyu, R., Clarke, K. C., Zhang, J., Feng, J., Jia, X., & Li, J. (2019). Spatial correlations among ecosystem services and their socio-ecological driving factors: A case study in the city belt along the Yellow River in Ningxia, China. *Applied Geography*, 108, 64-73.
- Mach, M. E., Martone, R. G., & Chan, K. M. A. (2015). Human impacts and ecosystem services: Insufficient research for trade-off evaluation. *Ecosystem Services*, 16, 112-120. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.10.018>
- Nadaraja, D., Lu, C., & Islam, M. M. (2021). The sustainability assessment of plantation agriculture-a systematic review of sustainability indicators. *Sustainable Production and Consumption*, 26, 892-910.
- O'Farrell, P. J., Reyers, B., Le Maitre, D. C., Milton, S. J., Egoh, B., Maherry, A., Colvin, C., Atkinson, D., De Lange, W., Blignaut, J. N., & Cowling, R. M. (2010). Multi-functional landscapes in semi arid environments: implications for biodiversity and ecosystem services. *Landscape Ecology*, 25(8), 1231-1246. <https://doi.org/10.1007/s10980-010-9495-9>
- Orsi, F., Ciolli, M., Primmer, E., Varumo, L., & Geneletti, D. (2020). Mapping hotspots and bundles of forest ecosystem services across the European Union. *Land Use Policy*, 99, 104840. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104840>
- Premo, L. S. (2004). Local spatial autocorrelation statistics quantify multi-scale patterns in distributional data: an example from the Maya Lowlands. *Journal of Archaeological Science*, 31(7), 855-866. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jas.2003.12.002>



- Putra, M. P. I. F., Pradhan, P., & Kropp, J. P. (2020). A systematic analysis of Water-Energy-Food security nexus: A South Asian case study. *Science of The Total Environment*, 728, 138451.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138451>
- Qian, X.-Y., & Liang, Q.-M. (2021). Sustainability evaluation of the provincial water-energy-food nexus in China: Evolutions, obstacles, and response strategies. *Sustainable Cities and Society*, 75, 103332.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103332>
- Qin, J., Duan, W., Chen, Y., Dukhovny, V. A., Sorokin, D., Li, Y., & Wang, X. (2022). Comprehensive evaluation and sustainable development of water–energy–food–ecology systems in Central Asia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 157, 112061. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112061>
- Renard, D., Rhemtulla, J. M., & Bennett, E. M. (2015). Historical dynamics in ecosystem service bundles. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(43), 13411-13416. <https://doi.org/doi:10.1073/pnas.1502565112>
- Rezaei Kalvani, S., & Celico, F. (2023). The Water-Energy-Food Nexus in European Countries: A Review and Future Perspectives. *Sustainability*, 15(6), 4960.  
<https://www.mdpi.com/2071-1050/15/6/4960>
- Sahle, M., Saito, O., Fürst, C., & Yeshitela, K. (2019). Quantifying and mapping of water-related ecosystem services for enhancing the security of the food-water-energy nexus in tropical data–sparse catchment. *Science of The Total Environment*, 646, 573-586.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.347>
- Schirpke, U., Candiago, S., Vigl, L. E., Jäger, H., Labadini, A., Marsoner, T., Meisch, C., Tasser, E., & Tappeiner, U. (2019). Integrating supply, flow and demand to enhance the understanding of interactions among multiple ecosystem services. *Science of The Total Environment*, 651, 928-941.
- Schröter, M., & Remme, R. P. (2016). Spatial prioritisation for conserving ecosystem services: comparing hotspots with heuristic optimisation. *Landscape Ecology*, 31, 431-450.
- Seto, K. C., Güneralp, B., & Hutyra, L. R. (2012). Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proceedings of the*



*National Academy of Sciences, 109(40), 16083-16088.*

<https://doi.org/doi:10.1073/pnas.1211658109>

Silva, J. G. D. (2012). *Feeding the World Sustainably*.

Song, S., Chen, X., Liu, T., Zan, C., Hu, Z., Huang, S., De Maeyer, P., Wang, M., & Sun, Y. (2023). Indicator-based assessments of the coupling coordination degree and correlations of water-energy-food-ecology nexus in Uzbekistan. *Journal of Environmental Management*, 345, 118674.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118674>

Sourmehi, C. (2021). *EIA projects nearly 50% increase in world energy use by 2050, led by growth in renewables*.

Sun, L., Niu, D., Yu, M., Li, M., Yang, X., & Ji, Z. (2022). Integrated assessment of the sustainable water-energy-food nexus in China: Case studies on multi-regional sustainability and multi-sectoral synergy. *Journal of Cleaner Production*, 334, 130235. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130235>

van den Heuvel, L., Blicharska, M., Masia, S., Sušnik, J., & Teutschbein, C. (2020). Ecosystem services in the Swedish water-energy-food-land-climate nexus: Anthropogenic pressures and physical interactions. *Ecosystem Services*, 44, 101141. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101141>

Vigiak, O., Borselli, L., Newham, L., McInnes, J., & Roberts, A. (2012). Comparison of conceptual landscape metrics to define hillslope-scale sediment delivery ratio. *Geomorphology*, 138(1), 74-88.

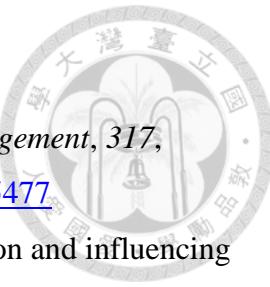
Wang, Q., Li, S., He, G., Li, R., & Wang, X. (2018). Evaluating sustainability of water-energy-food (WEF) nexus using an improved matter-element extension model: A case study of China. *Journal of Cleaner Production*, 202, 1097-1106.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.213>

Wang, S.-H., Huang, S.-L., & Huang, P.-J. (2018). Can spatial planning really mitigate carbon dioxide emissions in urban areas? A case study in Taipei, Taiwan. *Landscape and Urban Planning*, 169, 22-36.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.08.001>

Wang, Y., Wang, H., Liu, G., Zhang, J., & Fang, Z. (2022). Factors driving water yield ecosystem services in the Yellow River Economic Belt, China: Spatial heterogeneity



- and spatial spillover perspectives. *Journal of Environmental Management*, 317, 115477. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115477>
- Wang, Y., Xie, Y., Qi, L., He, Y., & Bo, H. (2022). Synergies evaluation and influencing factors analysis of the water–energy–food nexus from symbiosis perspective: A case study in the Beijing–Tianjin–Hebei region. *Science of The Total Environment*, 818, 151731. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151731>
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*. Department of Agriculture, Science and Education Administration.
- World Economic Forum, W. (2011). *Water Security - The Water -Food -Energy- Climate Nexus*.
- Xiao, Y., Huang, M., Xie, G., & Zhen, L. (2022). Evaluating the impacts of land use change on ecosystem service values under multiple scenarios in the Hunshandake region of China. *Science of The Total Environment*, 850, 158067. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158067>
- Xu, H., Wang, Y., Zhang, Z., Gao, Y., & Zhang, D. (2021). Coupling mechanism of water-energy-food and spatiotemporal evolution of coordinated development in the Yellow River Basin. *Resources Science*, 43(12), 2526-2537.
- Yang, W.-C., Lee, Y.-M., & Hu, J.-L. (2016). Urban sustainability assessment of Taiwan based on data envelopment analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 61, 341-353. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.015>
- Yang, Z., Zhan, J., Wang, C., & Twumasi-Ankrah, M. J. (2022). Coupling coordination analysis and spatiotemporal heterogeneity between sustainable development and ecosystem services in Shanxi Province, China. *Science of The Total Environment*, 836, 155625. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155625>
- Yi, J., Guo, J., Ou, M., Pueppke, S. G., Ou, W., Tao, Y., & Qi, J. (2020). Sustainability assessment of the water-energy-food nexus in Jiangsu Province, China. *Habitat International*, 95, 102094. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2019.102094>
- Yin, D., Yu, H., Shi, Y., Zhao, M., Zhang, J., & Li, X. (2023). Matching supply and demand for ecosystem services in the Yellow River Basin, China: A perspective of



- the water-energy-food nexus. *Journal of Cleaner Production*, 384, 135469.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135469>
- Yuan, M.-H., & Lo, S.-L. (2020). Ecosystem services and sustainable development: Perspectives from the food-energy-water Nexus. *Ecosystem Services*, 46, 101217.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101217>
- Zhang, J., Guo, W., Cheng, C., Tang, Z., & Qi, L. (2022). Trade-offs and driving factors of multiple ecosystem services and bundles under spatiotemporal changes in the Danjiangkou Basin, China. *Ecological Indicators*, 144, 109550.
- Zhang, J., Wang, S., Pradhan, P., Zhao, W., & Fu, B. (2022). Mapping the complexity of the food-energy-water nexus from the lens of Sustainable Development Goals in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 183, 106357.
- Zhang, P., Zhang, L., Chang, Y., Xu, M., Hao, Y., Liang, S., Liu, G., Yang, Z., & Wang, C. (2019). Food-energy-water (FEW) nexus for urban sustainability: A comprehensive review. *Resources, Conservation and Recycling*, 142, 215-224.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.11.018>
- Zheng, H., Li, Y., Robinson, B. E., Liu, G., Ma, D., Wang, F., Lu, F., Ouyang, Z., & Daily, G. C. (2016). Using ecosystem service trade-offs to inform water conservation policies and management practices. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 14(10), 527-532. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/fee.1432>
- Zhi, Y., Chen, J., Wang, H., Liu, G., & Zhu, W. (2020). Assessment of water-energy-food nexus fitness in China from the perspective of symbiosis. *China Popul. Resour. Environ*, 30(1), 129-139.
- 汪中安. (2022). 氣候與土地利用變遷情境下的都市熱島效應—以桃園市區為例.
- 林裕彬. (2021). 整合永續發展目標之生態系服務與土地治理：以濁水溪流域為例 - 利害關係人參與之土地系統模擬與生態系服務資源決策平台建置（子計畫八）. 國立臺灣大學生物環境系統工程學系暨研究所
- 葉春國, 莊永忠, & 廖學誠. (2013). 水里溪上游集水區檳榔園熱點空間分析之研究 [The Spatial Analysis of Betel Nut Plantation Hot Spots in the Upper Shui-Li Creek Watershed]. *中華水土保持學報*, 44(3), 202-214.  
[https://doi.org/10.29417/jcswc.201309\\_44\(3\).0002](https://doi.org/10.29417/jcswc.201309_44(3).0002)



蕭戎雯. (2013). 不同單元尺度對土地利用及生態系統服務模擬之影響-以大屯溪流域為例. 國立臺灣大學生物環境系統工程學系學位論文, 2013, 1-126.