



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 BioResources and Agriculture

National Taiwan University  
Master's Thesis

臺中市生態系服務對水-能源-糧食鏈結永續性的時空  
演變與影響評估

Spatiotemporal Evolution and Impact Assessment of  
Ecosystem Services on the Water-Energy-Food Nexus  
Sustainability in Taichung City

張喬雲

Ciao – Yun Chang

指導教授：林裕彬 博士

Advisor: Yu-Pin Lin, Ph.D

中華民國 114 年 6 月

June 2025



## 摘要

在全球氣候變遷與資源壓力日益嚴峻的背景下，如何在經濟發展與生態保育之間取得平衡，已成為永續發展的重要課題。水、能源與糧食三者之間具高度關聯性，形成所謂的水—能源—糧食鏈結(Water- Energy- Food Nexus, WEF Nexus)。然而，目前對於生態系服務 (Ecosystem Services, ESs) 與 WEF Nexus 永續性之間關聯性的探討仍顯不足，尤缺乏區域尺度的實證研究。臺中市作為臺灣主要都市之一，其快速的城市化與產業發展對區域資源與環境系統帶來高度挑戰，因而成為進行相關研究的重要案例區。本研究旨在透過 InVEST 模式與空間統計方法，量化臺中市 2007、2014 與 2021 年間生態系服務之空間分布，並結合 WEF Nexus 永續性指標，探討兩者間之空間權衡關係與耦合協調度模型。期望藉由本研究，提供臺中市永續資源管理之量化依據，並為整合生態系服務與資源鏈結永續性提出具體策略建議，進一步促進區域永續發展與政策規劃。

本研究以臺中市為研究區，針對 2007、2014 與 2021 年三個時間點，運用 InVEST 模式量化七項生態系服務，包括碳儲存、作物生產、氮、磷營養鹽留存、沉積物留存、都市降溫與產水量，並進行標準化處理後透過區域型局部空間關聯指標 LISA (local indicators of spatial association) 進行空間熱點分析，找出穩定且具包含四種以上生態系服務供應功能之熱區。另一方面，依據 T. Ding, Fang, Chen, Ji, and Fang (2023)提出之 WEF Nexus 永續性指標體系，蒐集十八項代表性指標並以熵權法計算其權重，建立水、能源、糧食三個子系統之永續性空間分佈。進一步，採用皮爾遜相關分析探討多項生態系服務與 WEF Nexus 永續性之間的權衡關係，並運用耦合協調度方法(Coupling Coordination Degree Method, CCDM)評估二者在行政區尺度上的耦合協同程度，揭示其潛在的空間協作與資源優化可能性。

研究結果表示臺中市具有四種以上生態系服務熱點的區域分布於全市 36% 至 38% 之間，主要集中於林地覆蓋區，凸顯自然植被對生態功能的貢獻。臺中市整體生態系服務以協同關係為主，惟作物生產、產水量與都市降溫等項目與其他服務間存在競爭或不穩定關係，主要受限於降雨與土地利用的時空變異性。WEF Nexus 永續性分析方面，東部山區在水與糧食子系統中表現出高度且穩定之永續性，西部都

市與農業區則因人口集中與資源需求壓力導致永續性偏低，能源子系統則在工業區域如大雅與西屯展現較佳表現。耦合協調度進一步揭示，和平區因森林覆蓋與自然資源優勢，整體協調度長期穩定表現最佳。碳儲存、營養鹽留存等調節型服務與WEF Nexus 永續性關聯高度協同，且整體協調性隨時間提升，反之，都市核心與農業平原地區則多呈現不協調狀態。其中，三個年份各行政區的沉積物留存則持續呈現不協調狀態。作物生產受限於旱作比例與都市化壓力，多數行政區呈現不協調或弱協調，特別是和平區長期高度不協調。Pearson 相關分析顯示，水與糧食子系統普遍與碳儲存、都市降溫、沉積物留存等服務具中至高度協同關係，能源子系統則僅與作物生產呈穩定正相關。三大子系統間競合與協同關係具時間動態，都市化與空間資源配置對整體耦合關係具有明顯影響。

本研究透過城市鄉鎮尺度探討生態系服務與水-能源-糧食鏈結永續性之空間與時間變化特性，透過耦合協調分析與權衡關係，揭示不同區域生態功能與資源系統間的互動關係與協同潛力。其研究成果可作為政府在國土規劃與資源管理政策制定之重要參考依據，亦可提供其他城市在推動多元生態系服務與WEF Nexus 永續性協調發展時之策略指引，促進永續城市治理與區域整合發展。

關鍵字:生態系服務、InVEST 模式、水-能源-糧食鏈結永續性、生態系服務熱點、權衡關係、耦合協調度

# Abstract

Amid escalating global climate change and increasing resource pressures, achieving a balance between economic development and ecological conservation has become a critical issue for sustainable development. The water-energy-food nexus highlights the highly interlinked nature of water, energy, and food systems, which are directly influenced by the supply and stability of multiple ecosystem services. However, current research on the relationship between ecosystem services and the sustainability of the WEF nexus remains insufficient, especially empirical studies at the regional scale. As one of Taiwan's major cities, Taichung has undergone rapid urbanization and industrial development, which has posed significant challenges to regional resources and environmental systems—making it an ideal case for this type of research.

This study aims to apply the InVEST model and spatial statistical methods to quantify the spatial distribution of seven ecosystem services in Taichung City for the years 2007, 2014, and 2021. These services include carbon storage, food production, nitrogen and phosphorus retention, sediment retention, urban cooling, and water yield. After standardization, hotspot analysis was conducted using local indicators of spatial association to identify areas with stable multifunctionality—defined as providing four or more ecosystem services. Meanwhile, based on the WEF nexus sustainability indicator system proposed by T. Ding (2023), eighteen representative indicators were collected and weighted using the entropy weight method to construct spatial distributions of sustainability across the water, energy, and food subsystems.

Subsequently, Pearson correlation analysis was used to examine the spatiotemporal trade-offs between various ecosystem services and the WEF nexus sustainability indices. The Coupling Coordination Degree Method was also employed to assess the degree of coordination between the two at the administrative district level, revealing potential areas for spatial collaboration and resource optimization.

The results indicate that areas with hotspots of four or more ecosystem services cover approximately 36% to 38% of Taichung's area, primarily concentrated in forested zones, highlighting the crucial role of natural vegetation in supporting ecological functions. Overall, ecosystem services in Taichung exhibit mainly synergistic relationships, though trade-offs or unstable interactions exist—particularly between crop production, water yield, and urban cooling—largely influenced by spatiotemporal variations in precipitation

and land use. In terms of WEF nexus sustainability, the eastern mountainous regions display high and stable performance in the water and food subsystems, whereas the western urban and agricultural zones show relatively lower sustainability due to population density and resource pressure. The energy subsystem performs better in industrial areas such as Daya and Xitun.

Coupling coordination analysis further reveals that Heping District, benefiting from its extensive forest cover and abundant natural resources, consistently exhibits the highest and most stable coordination levels. Regulating services such as carbon storage and nutrient retention show strong synergies with WEF sustainability, with overall coordination improving over time. In contrast, urban cores and agricultural plains often display uncoordinated states.

Notably, sediment retention remains in an uncoordinated state across all districts throughout the three study years. Crop production, constrained by a high proportion of dryland farming and urbanization pressures, demonstrates uncoordinated or weakly coordinated states in most districts—particularly in Heping District, which shows persistent high-level uncoordination.

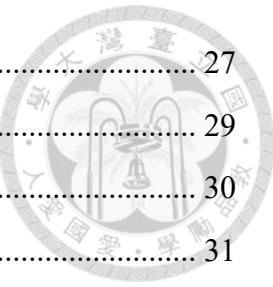
Pearson correlation analysis indicates that the water and food subsystems generally exhibit moderate to strong synergies with services like carbon storage and urban cooling. In contrast, the energy subsystem shows a stable positive correlation only with crop production. The competitive and synergistic relationships among the three subsystems vary over time, with urbanization and spatial resource allocation having a clear influence on the overall coupling dynamics. By examining the spatial and temporal dynamics of ecosystem services and WEF nexus sustainability at the township level, this study reveals the interactive relationships and coordination potential between regional ecological functions and resource systems through trade-off and coupling analysis. The findings provide a quantitative foundation for sustainable resource management in Taichung and offer strategic insights for integrating ecosystem services and WEF nexus sustainability, thereby promoting sustainable urban governance and regional integrated development.

**Keywords:** Ecosystem services, InVEST model, Water-Energy-Food nexus sustainability, Ecosystem service hotspots, Trade-off analysis, Coupling coordination degree

# 目次



摘要 .....	i
Abstract .....	iii
目次 .....	v
圖次 .....	ix
表次 .....	xii
第一章、前言 .....	1
1.1 研究動機 .....	1
1.2 研究目的 .....	3
1.3 研究架構 .....	4
第二章、文獻回顧 .....	6
2.1 土地利用與土地覆蓋變遷 .....	6
2.2 生態系服務 .....	7
2.2.1 生態系服務熱點 .....	9
2.3 水-能源-糧食鏈結永續性 .....	11
2.4 權衡關係 .....	12
2.5 耦合協調度分析 .....	13
第三章、研究方法 .....	15
3.1 研究區域 .....	15
3.2 生態系服務量化 .....	21
3.2.1 年產水量 .....	21
3.2.2 碳儲存 .....	22
3.2.3 作物生產 .....	24
3.2.4 營養鹽留存 .....	24
3.2.5 沉積物留存 .....	25



3.2.6 都市降溫 .....	27
3.3 热點分析 .....	29
3.3.1 空間自相關分析 .....	30
3.4 水-能源-糧食鏈結永續性指標 .....	31
3.4.1 水子系統 .....	33
3.4.2 能源子系統 .....	35
3.4.3 粮食子系統 .....	37
3.4.4 熵權法 (Entropy Weight) .....	38
3.5 PEARSON 相關係數 .....	40
3.6 耦合協調度 .....	41
第四章、研究結果 .....	43
4.1 生態系服務量化 .....	43
4.1.1 年產水量 .....	43
4.1.2 碳儲存 .....	46
4.1.3 作物生產 .....	48
4.1.4 營養鹽留存 .....	51
4.1.5 沉積物留存 .....	56
4.1.6 都市降溫 .....	58
4.1.7 生態系服務熱點 .....	63
4.1.8 生態系服務權衡關係 .....	66
4.2 WEF 永續性指標評估 .....	69
4.2.1 水子系統 .....	69
4.2.2 能源子系統 .....	71
4.2.3 粮食子系統 .....	73
4.2.4 WEF 永續性結果 .....	75
4.2.5 生態系服務熱區與全臺中市之永續性 .....	76
4.2.6 WEF 永續性指標權衡關係 .....	78
4.3 生態系服務與 WEF Nexus 永續性之間的關係評估 .....	79

4.3.1 耦合協調度分析 .....	79
4.3.2 生態系服務與 WEF Nexus 永續性之間的權衡關係.....	88
<b>第五章、結果討論 .....</b>	<b>90</b>
5.1 生態系服務 .....	90
5.1.1 產水量 .....	90
5.1.2 碳儲存 .....	91
5.1.3 作物生產 .....	92
5.1.4 營養鹽留存 .....	93
5.1.5 沉積物留存 .....	94
5.1.6 都市降溫 .....	95
5.1.7 生態系服務熱點 .....	96
5.1.8 生態系服務權衡關係 .....	98
5.2 WEF Nexus 永續性指標.....	101
5.2.1 水子系統 .....	101
5.2.2 能源子系統 .....	102
5.2.3 糧食子系統 .....	103
5.2.4 WEF Nexus 永續性指標權衡關係.....	104
5.3 生態系服務與 WEF NEXUS 永續性之間的關係評估 .....	108
5.3.1 生態系服務與 WEF Nexus 永續性之間的耦合協調度 .....	108
5.3.2 生態系服務與 WEF Nexus 永續性指標權衡關係.....	109
<b>第六章、結論與建議 .....</b>	<b>113</b>
6.1 結論 .....	113
6.2 建議 .....	114
<b>第七章、參考文獻 .....</b>	<b>116</b>
<b>附錄 .....</b>	<b>131</b>



## 圖次

圖 1 研究架構流程圖 .....	5
圖 2 臺中市區鄉鎮區圖 .....	15
圖 3 臺中市區域高程及範圍圖 .....	16
圖 4 臺中市 2007 年土地利用地圖 .....	18
圖 5 臺中市 2014 年土地利用地圖 .....	18
圖 6 臺中市 2021 年土地利用地圖 .....	19
圖 7 臺中市土地利用類別占比圖 .....	20
圖 8 區域型相關分佈範例 .....	30
圖 9 臺中市(a)~(c)產水量分佈；(d)~(f)降水量時空分佈圖(單位:毫米).....	44
圖 10 臺中市(a)~(c)產水量熱點分佈；(d)~(f)各行政區產水量平均值.....	45
圖 11 臺中市三年合併產水量熱點分佈情形及歷年產水量變化圖 .....	45
圖 12 臺中市(a)~(c)碳儲存量分佈圖(單位:Mg/ha) .....	46
圖 13 臺中市(a)~(c)2021 年碳儲存熱點分佈；(d)~(f)各行政區碳儲存平均值....	47
圖 14 臺中市三年合併碳儲存熱點分佈情形及歷年碳儲存量變化圖 .....	47
圖 15 臺中市(a)~(c) 2021 年作物(稻米+梨樹)生產熱點分佈(黃色: 稻米；橘色: 梨樹)；(d)~(f)各行政區作物平均值 .....	50
圖 16 臺中市三年合併作物生產熱點分佈情形及歷年作物生產量變化 .....	50
圖 17 臺中市(a)~(c)氮營養鹽輸出量分佈圖(單位:kg/ha).....	53
圖 18 臺中市(a)~(c)磷營養鹽輸出量分佈圖(單位:kg/ha).....	53
圖 19 臺中市(a)~(c)氮營養鹽留存熱點分佈；(d)~(f)各行政區營養鹽留存平均值 .....	54
圖 20 臺中市三年合併氮營養鹽留存熱點分佈情形及歷年總氮營養鹽輸出量變化 .....	54
圖 21 臺中市(a)~(c)磷營養鹽留存熱點分佈；(d)~(f)各行政區磷營養鹽留存平均值 .....	55
圖 22 臺中市三年合併磷營養鹽留存熱點分佈情形及歷年總磷營養鹽輸出量變化 .....	55



圖 23 臺中市(a)～(c)沉積物留存量分佈圖(單位:kg /ha).....	56
圖 24 臺中市(a)～(c)沉積物留存熱點分佈；(d)～(f)各行政區沉積物留存平均值.	57
圖 25 臺中市三年合併沉積物留存熱點分佈情形及歷年沉積物留存量變化圖 .....	57
圖 26 臺中市氣象測站分佈圖 .....	58
圖 27 2014 年參考測站逐時溫度平均與都市熱島強度圖 .....	59
圖 28 臺中市(a)～(c)都市降溫分佈圖 .....	60
圖 29 臺中市(a)～(c)都市降溫熱點分佈；(d)～(f)各行政區都市降溫平均值.....	61
圖 30 臺中市三年合併都市降溫熱點分佈情形及歷年熱調適指數變化圖 .....	62
圖 31 2007 年、2014 年、2021 年生態系服務數量占比圖 .....	63
圖 32 (a)～(c)生態系服務熱點分佈圖；(d)～(f)生態系服務熱點疊加圖.....	64
圖 33 2007 年各行政區生態系服務數值 .....	65
圖 34 2014 年各行政區生態系服務數值 .....	65
圖 35 2021 年各行政區生態系服務數值 .....	66
圖 36 臺中市各行政區 2007 年、2014 年、2021 年水子系統永續性 .....	69
圖 37 臺中市水子系統永續性指標分佈 .....	70
圖 38 臺中市各行政區 2007 年、2014 年、2021 年 能源子系統永續性 .....	71
圖 39 臺中市能源子系統永續性指標分佈 .....	72
圖 40 臺中市各行政區 2007 年、2014 年、2021 年糧食子系統永續性 .....	73
圖 41 臺中市糧食子系統永續性指標分佈 .....	74
圖 42 臺中市 2007 年、2014 年、2021 年永續性 .....	75
圖 43 臺中市 2007 年生態系服務熱區內與全臺中市之永續性比較 .....	77
圖 44 臺中市 2014 年生態系服務熱區內與全臺中市之永續性比較 .....	77
圖 45 臺中市 2021 年生態系服務熱區內與全臺中市之永續性比較 .....	77
圖 46 2007 年、2014 年、2021 年產水量與 WEF Nexus 永續性之協調度 .....	81
圖 47 2007 年、2014 年、2021 年碳儲存與 WEF Nexus 永續性之協調度 .....	82
圖 48 2007 年、2014 年、2021 年作物生產與 WEF Nexus 永續性之協調度 .....	83
圖 49 2007 年、2014 年、2021 年氮營養鹽留存與 WEF Nexus 永續性之協調度	84
圖 50 2007 年、2014 年、2021 年磷營養鹽留存與 WEF Nexus 永續性之協調度	85

圖 51 2007 年、2014 年、2021 年沉積物留存與 WEF Nexus 永續性之協調度 .. 86

圖 52 2007 年、2014 年、2021 年都市降溫與 WEF Nexus 永續性之協調度 ..... 87



## 表次



表 1 《千禧年生態系統評估 (Millennium Ecosystem Assessment)》	8
表 2 土地利用分類編碼	17
表 3 臺中市土地利用面積(單位:公頃)	20
表 4 土地利用類型之碳庫量(Mg/ha)	23
表 5 土地利用類型之營養鹽參數表	25
表 6 土地利用類型之沉積物留存參數表	26
表 7 WEF Nexus 永續性指標 T. Ding et al. (2023)	32
表 8 CCD 的類型和分類表	42
表 9 稻米以及梨樹 2007 年、2014 年、2021 年實際產量與模擬產量之計算表	49
表 10 InVEST Urban Cooling 驗證資料與結果	59
表 11 權衡關係的相關程度分類表	67
表 12 2007 年生態系服務之間的 Pearson 相關係數	68
表 13 2014 年生態系服務之間的 Pearson 相關係數	68
表 14 2021 年生態系服務之間的 Pearson 相關係數	68
表 15 臺中市 2007 至 2021 年生態系服務熱區與全臺中市 WEF Nexus 永續性比較	76
表 16 2007、2014、2021 年 WEF Nexus 永續性指標之間的 Pearson 相關係數	78
表 17 2007 年生態系服務與 WEF Nexus 永續性指標之間的 Pearson 相關係數	89
表 18 2014 年生態系服務與 WEF Nexus 永續性指標之間的 Pearson 相關係數	89
表 19 2021 年生態系服務與 WEF Nexus 永續性指標之間的 Pearson 相關係數	89
表 20 水永續性指標原始數值	131
表 21 能源永續性指標原始數值	133
表 22 糧食永續性指標原始數值	134
表 23 水永續性指標標準化數值	136
表 24 能源永續性指標標準化數值	137
表 25 糧食永續性指標標準化數值	139
表 26 水永續性指標熵值	140

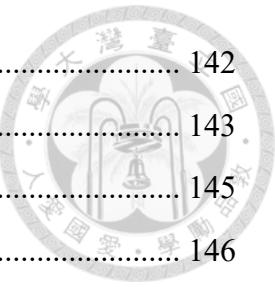


表 27 能源永續性指標熵值 .....	142
表 28 糧食永續性指標熵值 .....	143
表 29 水永續性指標權重 .....	145
表 30 能源永續性指標權重 .....	146
表 31 糧食永續性指標權重 .....	148
表 32 水永續性指標的綜合評估值 .....	149
表 33 能源永續性指標的綜合評估值 .....	151
表 34 糧食永續性指標的綜合評估值 .....	152
表 35 水、能源、糧食鏈結永續性的綜合評估值 .....	154



## 第一章、前言

### 1.1 研究動機

在當前全球化的背景下，永續發展已成為一個重要的議題，強調經濟、社會與環境三個基本維度的協同發展。這一概念旨在促進社會的整體進步，並引起廣泛的關注。永續發展的核心在於防止某一方面的利益增長以犧牲其他方面的發展及社會整體利益，因此，探索如何在這三個維度間取得平衡，成為實現持續繁榮的關鍵。在 2015 年，聯合國宣布「2030 永續發展目標」(Sustainable Development Goals, SDGs)，SDGs 包含了 17 項核心目標，指引全球共同努力，以實現人與自然永續和諧發展 (Connor, 2015)。而水、能源與糧食之間的相互關係與聯合國永續發展目標 (SDGs) 密切相關，如 SDG 2 強調糧食安全，依賴於水資源和永續能源；SDG 6 關注水資源的管理，對農業生產至關重要；而 SDG 7 則支持水和糧食的永續發展。水、能源、糧食作為基礎物質資源，對於滿足人類生產生活發揮至關重要的作用 (J. Chen, Ding, Wang, Yu, & Health, 2019)，三者之間存在著複雜的相互作用。2011 年波昂會議上首次被概括為「水-糧食 - 能源鏈結」(Water- Food - Energy Nexus, WEF Nexus)(Hoff, 2011)。

生態系服務 (Ecosystem Services, ESs) 是生態系直接或間接為人類提供的效益 (Assessment, 2001; Costanza et al., 1997)，是連結生態系和社會系統的重要橋樑 (Liu et al., 2022)。在社會生態研究領域，生態系服務在實現永續發展目標中的作用被認為是至關重要的 (Yin et al., 2023)。Reyers and Selig (2020) 也提到從自然資源中獲得生態系統服務的持續供應對於實現永續區域發展至關重要。然而，廣泛的人類干預 (Unep & digital technologies, 2021; Zeren Cetin, Varol, & Ozel, 2023)、資源無節制的消耗 (SHEN, LI, LIANG, WANG, & SUN, 2021)、環境的嚴重污染 (Zeren Cetin & Sevik, 2020) 已成為全球實現永續發展目標的主要障礙 (Shi et al., 2019)。

水、能源和糧食鏈結和生態系服務之間的關係密切，水、能源和糧食三種鏈結資源的生產和供應依賴於多種生態系服務的支持。例如，產水量和作物生產等生態系服務可以為人類提供乾淨的水和充足的糧食 (Wood et al., 2018)，土壤保持有利於提高糧食產量，增加水分入滲和土壤蓄水能力 (T. Ding et al., 2023)。然而當前，

氣候變遷和人口增長持續提高對三種關鍵資源的需求，這使得各類生態系統服務的供應能力面臨愈加嚴峻的挑戰。此外，都市化和工業化等人類活動導致水資源的污染和過度開發，進一步加劇了水資源的短缺以及區域間的不平等現象。同樣，生態系服務的供應短缺也會威脅到三種鏈結資源的穩定供應，進一步影響鏈結的永續性(Hanes, Gopalakrishnan, & Bakshi, 2018)。

因此，深入探討 WEF Nexus 永續性與多項生態系服務之間的關係顯得尤為重要，以促進區域資源與生態系統的權衡與協調發展。儘管越來越多的公共機構已開始認識到將生態系統服務資訊納入政策和決策過程的重要性(Bateman et al., 2013; McIntyre, Moore, & Yuan, 2008)，但在水-能源-糧食鏈結的背景下，生態系統服務與永續性之間的關聯性仍尚未得到充分探討(Bidoglio & Brander, 2016; Hanes et al., 2018)。

臺中市為臺灣的第二大城市，地理位置優越，為臺灣中部的交通樞紐，同時也是工業和商業的重心。該市擁有多樣化的產業結構，包括製造業、科技業和服務業，其工業發展位居全國第三，僅次於桃園市和高雄市，人口約達 285 萬。然而，大量人口的流入，導致土地利用規模也隨之變化。臺中市的快速社會經濟發展和城市化進程對區域資源及生態系統的協調造成了相當大的壓力。因此，本研究選定臺中市作為研究區域，探討 WEF Nexus 永續性與多重生態系服務之間的關係的，以期為相關政策提供參考依據。



## 1.2 研究目的

由於現有的文獻及討論主要集中於評估水-能源-糧食鏈結永續性以及量化多項生態系服務，但對於這兩者之間的關係卻缺乏深入的研究與探討，但這一點尤其重要，因為水、能源和糧食的供應與生態系服務之間存在著密切的互動，彼此影響著資源的永續性。因此，本研究的目標旨在評估臺中市在 2007 年、2014 年、2021 年七項生態系服務（營養鹽留存分為氮、磷兩項來進探討）與水-能源-糧食鏈結永續性，藉由量化臺中市生態系服務與水-能源-糧食鏈結永續性之間的關係，提供更全面的見解，促進對臺中市資源管理的有效策略，並為未來的政策制定提供科學依據，以支持區域的永續發展。本研究目的可分為以下三點，如下所列：

### 1. 分析區域內生態系服務熱點

使用 InVEST 模式量化區域內七種生態系服務，包括碳儲存、作物生產、氮、磷營養鹽留存、沉積物留存、都市降溫、產水量，並將其標準化以獲得各項生態系服務之空間分佈，然後以區域型局部空間關聯指標（Local Indicators of Spatial Association, LISA）找出區域內的生態系服務熱區，並將同時具有四種以上生態系服務熱區定義為生態系服務綜合熱區。

### 2. 分析區域內水-能源-糧食鏈結永續性指標

根據 T. Ding et al. (2023)研究中之 WEF Nexus 鏈結永續性指標體系，將每個子系統均選出六項指標來進行運算，使用熵權法（Entropy Weight Method）運算指標權重，獲得水-能源-糧食鏈結永續性之空間分佈。

### 3. 分析區域內生態系服務與水-能源-糧食鏈結永續性之權衡關係與耦合協調度

為了評估水-能源-糧食鏈結永續性與各項生態系服務之間的權衡關係，本研究使用皮爾遜相關分析（Pearson Correlation Analysis）分別探討生態系服務間、水-能源-糧食鏈結永續性間以及生態系服務與水-能源-糧食鏈結永續性間之權衡關係。再利用耦合協調度方法（Coupling Coordination Degree Method, CCDM）來計算各項生態系服務與水-能源-糧食鏈結永續性之間的耦合協調度（Coupling Coordination Degree Method, CCDM）。

## 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 2007 年、2014 年、2021 年之生態系服務
  - (1) 蒐集 InVEST 模式所需之地理空間資訊資料及各項生態系服務所需輸入之相關參數。
  - (2) 進行碳儲存、作物生產、氮、磷營養鹽留存、沉積物留存、都市降溫、產水量七項生態系服務計算。
  - (3) 將 InVEST 模式輸出之產水量、碳儲存、作物生產、沉積物留存、都市降溫結果進行標準化，其中氮、磷營養鹽輸出則採用逆標準化轉換為氮、磷營養鹽留存。
2. 進行 2007 年、2014 年、2021 年之生態系服務熱點分析
  - (1) 使用區域型局部空間關聯指標 LISA 進行各年份之生態系服務熱點分析，並將其結果中 High-High 的區域定義為生態系服務熱點區域。
  - (2) 將 2007、2014、2021 三個年份之生態系服務熱點聯集區域視為可穩定提供生態系服務熱點之區域。
  - (3) 更進一步疊加七項生態系服務之熱點，並將同時提供四種(含)以上生態系服務熱點區域視為生態系服務綜合熱點之區域。
3. 量化計算水-能源-糧食永續性指標
  - (1) 在 T. Ding et al. (2023)研究之鏈結永續性指標體系中，將每個子系統均選出六項指標，共計十八項指標來進行運算。
  - (2) 蒐集各項指標所需相關資料，並進行各指標計算。
  - (3) 使用熵權法計算指標在子系統中的權重以及指標在整個系統中的權重，得出水-能源-糧食永續性數值及其空間分佈。
4. 生態系服務與水-能源-糧食永續性指標之權衡關係
  - (1) 計算皮爾遜相關分析，探討 2007 年、2014 年、2021 年生態系服務七項間、水-能源-糧食鏈結永續性三項間之權衡關係。
  - (2) 比較 2007 年、2014 年、2021 年之生態系服務與水-能源-糧食鏈結永續性指標之權衡關係的變化。



- (3) 探討生態系服務與水-能源-糧食鏈結永續性指標之顯著性。
5. 生態系服務與水-能源-糧食鏈結永續性指標之耦合協調度分析
- (1) 使用耦合協調度方法計算生態系服務與水-能源-糧食鏈結永續性指標之耦合協調度。
  - (2) 探討、評估各項生態系服務與水-能源-糧食鏈結永續性指標在行政區尺度上空間分佈。



圖 1 研究架構流程圖

## 第二章、文獻回顧

### 2.1 土地利用與土地覆蓋變遷

土地利用 (Land Use) 是指人類為達成各種目的而對土地進行的改造與利用形式，涵蓋農業生產、城市發展與工業建設等多種用途；相對地，土地覆蓋 (Land Cover) 則描述地表可觀察之物理覆蓋類型，如自然植被、水體與人工建物等。因此，土地利用和土地覆蓋 (Land Use and Land Cover, LULC) 變遷反映了土地使用方式與地表覆蓋狀況在質與量上的變化，這不僅是人類活動對自然系統作用的具體體現，也揭示了自然環境對人類社會的反饋。理解 LULC 變遷對於資源管理、環境保護與永續發展策略的制定具有核心價值 (Finegold & Ortmann, 2016; Fisher, Comber, & Wadsworth, 2005; Yonaba et al., 2021)。

土地利用變遷是自然資源演變的關鍵指標，對於生態系服務有著重要的影響。景觀變化常由多重驅動因子相互作用所致，探究其對生態系統功能與社會系統的影響，有助於推動更有效的土地規劃與永續管理 (Brown, Verburg, Pontius Jr, & Lange, 2013; Verburg, 2006; Yonaba et al., 2021)。LULC 變遷對全球的水、生態系統功能、人類福祉和永續發展有著巨大的影響。土地利用數量和模式的變化以及土地利用結構和空間配置往往會直接影響特定區域內主要生態過程的結構和功能，從而影響生態系統的功能和價值 (J. Chen et al., 2019; Vitousek, 1994; Zorrilla-Miras et al., 2014)。尤其自工業革命以來，最重要的人類活動，如過度開墾、過度放牧、大面積砍伐森林、大規模建設工業、城市、交通、能源和水利基礎設施等，對長期 LULC 變化產生了重大影響 (Aslam, Rana, & Bhatti, 2021; Roy et al., 2022; Su, Chen, Li, & Wang, 2024)。LULC 變化的變化反過來又刺激可能對自然生態系統產生嚴重後果的變化。

在研究方面，Bai, Ochuodho, and Yang (2019) 以空間明確的方式量化土地利用和氣候變遷對美國肯塔基州與水相關的生態系服務之影響，使用研究中製定的兩個指標來評估土地利用和氣候變遷對這些生態系服務之影響。研究指出，氣候變遷對水分保持的影響大於土地利用變遷，而後者對土壤保持與氮、磷輸出影響更為顯著。同樣地，Kreuter, Harris, Matlock, and Lacey (2001)、Krkoška Lorencová,

Harmáčková, Landová, Pártl, and Vačkář (2016) 等人亦指出，都市化土地利用變遷透過改變碳平衡與養分循環，對生態系服務產生重大衝擊。Lautenbach, Kugel, Lausch, and Seppelt (2011) 與 Hoyer and Chang (2014) 則進一步證明，土地利用也隨時間的空間變化對景觀中生態系服務的未來提供和位置有重大影響。

近年來，隨著永續發展研究的深化，學界也逐漸將生態系統、土地與碳循環納入水-能源-糧食 (WEF) 關聯分析中(Chai, Shi, Lu, & Hu, 2020; R. Zhao et al., 2018)。相較於其他外在因素，土地利用變化對 WEF Nexus 的影響更直接且緊密的影響力。能調節水資源、能源和糧食的生產與消費，透過土地利用政策和技術的應用，可以優化系統，並將土地視為 WEF 的載體。當前研究大多聚焦於土地利用對環境與經濟效益的影響，例如 W. Li, Kang, and Wang (2024)探討的生態系服務和碳排放減量之策略，而 Yikun Zhang and Wang (2024) 則提出「人類活動-土地利用-WEF 關係」的新理論架構，量化評估了 2000-2020 年長江流域九個省份 WEF 系統與土地利用變化的耦合協調關係，並基於不同土地利用政策預測了 WEF 系統的演化情況。

## 2.2 生態系服務

生態系服務 (Ecosystem services, ESs) 被廣義地定義為人類直接或間接從生態系獲得的利益，生態系的持續提供是人類福祉的資源和環境基礎(Costanza et al., 1997)。根據 2005 年聯合國《千禧年生態系統評估 (Millennium Ecosystem Assessment)》整理出生態系服務與人類福祉的關聯性，包括四個主要類別：供給 (Provisioning)、支持 (Supporting)、調節 (Regulating) 和文化 (Cultural) 服務，如表 1 所示，這些服務涵糧食生產、物質供應、氣候調節、抗災能力、棲息地維護、景觀美學和壓力緩解等多個維度為全球永續發展做出了不可或缺的貢獻 (Costanza et al., 1997)。

然而，Verburg (2006)指出，隨著公眾需求的增加和全球環境的變化，生態系統提供生態系統服務的能力正受到前所未有的威脅。持續的都市化和工業化加劇了生態環境的破壞，導致全球 ES 迅速減少(Liu et al., 2022)。《千禧年生態系服務評估》報告亦顯示，在過去半個世紀以來，全球 24 項服務中有 15 項出現了不同程度的下降，例如侵蝕調節、水淨化和自然災害調節，而這種趨勢在未來可能會加速直接威脅到地區和全球的生態安全。

表 1《千禧年生態系統評估 (Millennium Ecosystem Assessment)》

服務類型	相關服務項目
供給服務	指生態系提供原料與資源等，例如：糧食供應（包括作物、海產和可供狩獵的野生動物）、木材、水、藥物、工業原料、燃料等
支持服務	指生態系為動植物提供生存空間與維護物種/品種多樣性。 如循環養分、化育土壤或為作物授粉
調節服務	指提供調節功能，例如：調節氣候、洪泛和疾病管理、水和空氣淨化
文化服務	指人類接觸生態系所獲得非物質上之益處，如美學、靈性啟發、教育、科學研究和休閒娛樂等，對人類的福祉至關重要，包括安全、健康、社會關係的良好發展，以及自由選擇和行動的權利等

生態系統服務的概念強調了生態、經濟和社會領域之間對自然生態系統綜合管理的緊密聯繫。為此，生態系服務的量化、繪圖和評估正在成為自然資本管理和政策制定的重要且可靠的工具(Bai, Zhuang, Ouyang, Zheng, & Jiang, 2011)。本研究是採用 2007 年由美國史丹佛大學(Stanford University)、美國明尼蘇達大學(University of Minnesota)、大自然保護協會(The Nature Conservancy)與世界自然基金會(World Wildlife Fund)等聯合開發之工具：生態系統服務和權衡綜合評估 (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs, InVEST) 來進行分析。

InVEST 模型是一個不斷開發的空間分析工具，用於對生態系統服務值進行建模、量化和映射。它被廣泛的使用，包括最近的全球應用(Chaplin-Kramer et al., 2019)。模型採用 R. 開發的基本框架，透過區分“供應、服務和價值”，將工業流程與為人類帶來的優勢聯繫起來。此模型可以協助評估土地利用與土地覆蓋變遷變化對生態系統服務的影響，幫助決策者評估自然資本的價值以及與替代解決方案相關的權衡，並將可持續性和人力整合起來發展。它利用環境資料來調查生態系統的變化將如何影響人類的利益，並提供基於自然資源管理的決策，是一種能夠定量評估不同場景下生態系服務的視覺化工具。與其他水文模型相比，此模型能夠基於更少的輸入資料和更少的經驗知識來定量評估與水相關的生態系服務。

此外，InVEST 不僅可評估產水量、水質、土壤保持、碳儲量、生物多樣性等

多種生態系服務，也可整合多種生態系服務權衡，為決策提供基礎(Goldstein et al., 2012; Nelson et al., 2009)。例如，Daneshi et al. (2021)使用 InVEST 模型工具中的水產量模組，模擬伊朗北部地區在氣候與土地利用變遷下的水供需變化，並轉化為水資源壓力指標以預估未來經濟風險。Bai et al. (2019)在在肯塔基州針對產水量、土壤保持與水質淨化等服務進行量化分析，深入探討不同管理實踐對生態系服務的影響與權衡關係。

綜上所述，InVEST 模型已在世界各地應用於 ES 評估。本研究使用 3.14.0 版本的 InVEST 模式量化生態系服務，分別使用產水量 (Annual Water Yield)、作物生產 (Crop Production)、碳儲存 (Carbon Storage and Sequestration)、氮、磷營養鹽留存 (Nutrient Delivery Ratio)、沉積物留存 (Sediment Delivery Ratio)、都市降溫(Urban Cooling) 模組來量化三個年份(2007 年、2014 年、2021 年)之臺中市之生態系服務。

### 2.2.1 生態系服務熱點

空間自相關是一種用於檢測空間對象之間關聯程度的重要統計方法，主要分為兩類：全域型相關 (Global Spatial Autocorrelation) 與區域型相關 (Local Spatial Autocorrelation)。全域型相關旨在用於描述特定現象在整體區域的分佈狀況，進而判斷該現象是否在在空間上呈現聚集特徵。然而，這一方法無法確切指出聚集現象的具體地區。相對而言，區域型相關則能夠推算出聚集地的範圍，並區分出空間現象的聚集點，進而衡量各空間單元對整體空間的影響程度，尤其是對於影響程度較大的特異區域(林真真等，2017)。

Moran's I 是一種廣泛應用的空間自相關統計量，該指標利用空間連續性矩陣來評估每個位置的屬性值與其相鄰位置之間的相關性。由 Moran (1950) 提出，透過空間連續性矩陣衡量地理單元的屬性值與鄰近單元之間的關聯性，經過標準化後，Moran's I 的值範圍介於 -1.0 至 1.0 之間。其中，當 Moran's I > 0 時，表示存在空間正相關性，且其值越大，空間相關性越強；相反，當 Moran's I < 0 時，則顯示空間負相關性，其值越小，空間差異越顯著；若 Moran's I = 0，則表示空間關係呈隨機性。此外基於 Moran's I 指標，Anselin (1995)進一步基於原始的 Moran's I 指標，納入了空間相鄰權重的考量，推導出一類新的區域型局部空間關聯指標

LISA (local indicators of spatial association)，將空間局部關聯性劃分為四個聚集象限：高-高 (H-H)、低-高 (L-H)、低-低 (L-L) 及高-低 (H-L)，藉此劃分有助於揭示高低觀測值區域單元之間的空間關係，並識別出空間關聯的全局模式、空間異常及局部不穩定性，以更精確地描述地理區域的關聯特性。

目前有許多研究及論文使用生態系服務熱點區域來進行相關探討。J. Lu, Cheng, Qi, Chen, and Lin (2024) 針對 2000 至 2022 年間城市荒野生態系服務 (UWES) 相關文獻進行綜合分析，指出研究大致可劃分為初步探索與快速成長兩個階段，主要熱點涵蓋城市綠地生態系比較、時空動態、生態系服務價值評估及其與人類健康的關聯，強調人與自然和諧共處的理念，並為 UWES 的應用提供參考。H. Chen et al. (2022) 探討了上海大都會區五種主要生態系統服務的空間模式，包括糧食產量、水源供給、洪水調節、溫度調節和休閒服務，研究發現生態系服務及其熱區分佈存在顯著的空間異質性，雖然生態系服務熱點地區僅佔總面積 30% 左右，卻提供每個生態系服務 55% 以上的供給，顯示部分區域具高效率供給能力。此類高效供給區主要分佈在西南部和北部，並呈現服務重疊現象，涵蓋兩項以上 ES 的複合熱點面積達 27.88%，對於藍綠基盤空間規劃具有高度參考價值。

國內亦有相關研究針對臺灣地區進行生態系服務熱點的探討。例如，張文豪 (2018) 以陳有蘭溪流域為例透過空間自相關分析 LISA 辨識 1999 年之生態系服務熱點分佈，並結合不同保護區劃設情境模擬 2023 年土地利用與生態服務變化，提供整合氣候變遷與土地利用情境下之政策參考。周品樺 (2024) 則同樣聚焦於陳有蘭溪流域，應用 InVEST 模型量化多項 ES 服務並進行熱點分析，結果顯示 14% 的土地為綜合熱點，主要在林地，65% 位於國有林地內。研究亦指出，未來產水量將受氣候變遷影響較大，而其他服務則以土地利用變遷為主因，建議將部分熱點區域納入國土保安區以加強管理與保護。

上述研究可知，生態系服務熱點區域分析能有效辨識高價值生態資源區位，並支援資源配置與政策優先順序的制定。因此，在本研究中是採用區域型局部空間關聯指標 (LISA) 分析臺中地區生態系服務熱點區域。



## 2.3 水-能源-糧食鏈結永續性

永續發展是一個重要理念，旨在滿足當代人需求的同時，保護未來世代滿足其需求的能力。隨著全球面臨環境退化、氣候變化和社會不平等等挑戰，永續發展的必要性愈加凸顯。這一概念強調經濟發展、社會福祉與環境永續之間的協調，創造一個更加公平和永續的未來，關鍵概念作為一種整合經濟、社會和環境三個基本維度的平衡以確保代際和代內公平的方式而受到廣泛關注(Griggs et al., 2013)。

水、能源和糧食是社會經濟發展的重要資源與物質基礎(L. Sun et al., 2022)。它們之間是相互依賴和影響的關係。三者之間的供應和需求相互交織，任何一環節的變化都會影響到其他環節的穩定性和永續性。因此這三者的資源整合管理，對於全球變化、提高資源利用率和實現永續性發展具有重要的意義。

水-能源-糧食之間錯綜複雜的關係在 2011 年波昂會議上首次被概括為「水-能源-糧食鏈結」(Water- Food - Energy Nexus, WEF Nexus)(Hoff, 2011)。此鏈結旨在透過減少權衡、增強協同效應，改善水、能源和糧食三種鏈結資源之間的合作，從而實現水-能源 - 糧食鏈結的永續性(L. Sun et al., 2022; L. Wu, Elshorbagy, Pande, & Zhuo, 2021)。水、能源、糧食是人類生存和發展不可或缺的基礎資源；它們相互依存、相互關聯，為人類生活提供重要的生態系服務(D. Han, Yu, & Cao, 2020)。此外，生態系服務在 WEF Nexus 的安全中發揮關鍵的支持作用(Rasul, 2014)。然而，隨著全球人口加速成長和社會經濟快速的發展，預計到 2030 年，人類對三大紐帶資源水、能源、糧食的需求將分別成長約 40%、50%和 35%(Council, 2012)。這些關鍵資源相關的生態系統服務需求顯著上升，各種因素共同造成了對生態系統服務供需平衡的前所未有的壓力。

生態系統提供多種服務，而這些服務最終是水、能源與糧食供應的基礎，氣候變遷與人口增加進一步加劇了對這三類資源及其相關生態系統服務的需求，在此背景下，生態系統服務與水-能源-糧食鏈結永續性議題更值得關注，特別是在表達對多尺度永續發展的期望與願景方面(Bhaduri, Ringler, Dombrowski, Mohtar, & Scheumann, 2015; Verma & Raghubanshi, 2018)，針對此相關的議題，我們需要加強探討 WEF Nexus 與生態系服務之間的關係，以促進生態系統服務的管理，實現區域的永續發展，近年來有許多研究進行了相關之闡述並進行了分析。Yuan and Lo

(2020) 研究探討了主要生態系統服務糧食-能源-水(FEW)的永續性的影響，研究結果表明生態系服務是實現永續發展目標的關鍵因素，並且分析了生態系服務、FEW 永續性和地區 GDP 之間的關係，並提出了平衡經濟發展與生態保護的建議。K. Wang et al. (2024)研究採用「測量-評估-辨識」的綜合框架，評估了西遼河流域食物-能源-水 (FEW) 的永續性，並分析相關生態系服務的供給和需求動態，研究結果發現 FEW Nexus 的永續性和生態系服務供給需求的協調水平整體有所提升，但仍有待進一步優化的空間，尤其是碳封存服務的供給不足嚴重影響了 FEW Nexus 的永續性，這在城市化程度較高的地區尤為突出。T. Ding et al. (2023)以長三角城市群為例，建立了一個分析架構來評估鏈結永續性與多重生態系服務（水產量、碳儲量、土壤保持和作物生產）之間的關係。結果發現鏈結永續性與水產量大多處於協調狀態，但與其他生態系服務存在顯著的空間異質性。水子系統永續性與其他生態系服務呈現顯著正相關，而能源子系統永續性與眾多生態系服務則關聯不顯著，此外，提出了基於區位的管理措施和跨城市合作等方式來促進資源與生態系統的協調發展。

## 2.4 權衡關係

生態系統服務之間的相互關係主要表現為競合與協同作用，這種關係受到土地利用變化、氣候變遷與景觀結構等因素的影響，對區域生態管理與永續發展至關重要。競合是指當某一類 ES 增加時，可能導致另一類 ES 減少，通常發生於不同生態功能之間的競爭，如作物生產的增加可能會降低水資源供應或碳封存能力；而協同作用則指多種 ES 可同時增加，如森林覆蓋的提升能促進水源涵養、土壤保持與碳封存的共同增長。此外，生態系服務的熱點區域與權衡關係的時空分佈也成為研究關鍵，透過分析不同 ES 熱點的與權衡關係的變化，可進一步理解景觀格局對生態服務供需動態的影響，為區域永續發展提供決策依據。W. Li et al. (2024) 研究分析了中國西南地區 ESs 的空間特徵、競合與協同關係，並識別了不同 ESs 之間的關係。其結果發現西南地區多元生態系統服務景觀指數 (MESLI) 呈現空間異質性，林地和草地主導區域 MESLI 較高，而農田和建成區 MESLI 較低，供給服務與調節服務存在競合關係，但調節服務之間呈現協同關係，不同 ESs 內的服務關係會隨空間位置與類型變化。景觀組成對 ESs 權衡關係的影響大於景觀配置，

其中林地面積比例對多數 ESs 束貢獻最大，而農田面積比例則是某些特定 ESs 束的主要驅動因素，反映出景觀組成與 ESs 之間的尺度依賴性。Yin et al. (2023) 以黃河流域為案例，從水—能源—糧食 (WEF) 視角出發，選擇產水量 (WY)、碳儲存 (CS) 與作物生產 (FP) 三項生態系服務進行時空變化與供需權衡分析，揭示出不同城市尺度下，三項生態系服務的供需關係具顯著相關性。

## 2.5 耦合協調度分析

耦合協調度 (Coupling Coordination Degree, CCD) 分析是一種評估多系統交互關係的方法，特別是在 ES 與 WEF Nexus 永續性研究中應用廣泛，旨在理解不同系統間的互動程度，並找出促進其協同發展的關鍵因素。耦合概念最早源自物理學，主要描述兩個或多個子系統之間以不同方式相互作用的現象；而協調度 (Coordination Degree) 則是在這個基礎上，進一步考量系統在發展過程中的同步性與平衡性。當系統之間的發展趨勢一致且相互促進時，協調度較高，反之則顯示出系統發展的不均衡性與潛在的競爭關係。為了評估這些子系統之間的協調發展程度，提出了 CCD 指數，提供了一種量化的評估方法，旨在衡量子系統之間的一致性和協同性，並反映系統從無序到有序的演變趨勢。此外，為了衡量子系統之間的耦合協調程度，提出了耦合協調度模型 (Y. Li, Li, Zhou, Shi, & Zhu, 2012)，該模型能夠考慮多個指標，全面反映子系統間的相互作用和協調關係，並在資源與環境領域中得到了廣泛的應用。Yang, Zhan, Wang, and Twumasi-Ankrah (2022) 利用 CCDM 評估了山西省永續發展與生態系服務的耦合協調狀況；W. Li, Wang, Xie, and Cheng (2021) 則研究綜合耦合協調度模式和地理與時間加權迴歸模型，以計算 1997-2015 年重慶市縣域尺度上，城市化與生態系統健康 (Urbanization And Ecosystem Health, UAEH) 的交互關係與時空異質性。L. Chen et al. (2024) 研究聚焦於成渝城市群，探討山區城市的生態系服務與永續發展目標 (SDGs) 之間的時空關係，研究旨在建立本地化的永續發展評估架構，量化三類 SDGs (經濟、社會、環境) 及四個環境要素 (產水量、土壤保持、棲地品質、碳儲存量)，採用方法包括 InVEST 模型進行生態系服務量化評估、熵權法確定指標權重，以及 Spearman 相關性分析和多尺度地理加權迴歸 (MGWR) 分析生態系服務與 SDGs 的關係，最後利用自組織映射 (SOM) 進行空間聚類。

儘管 CCDM 能夠評估鏈結永續性與生態系統之間的協調關係，但它無法反映這兩者之間的相關性。因此，探索關係的永續性與生態系統之間的相關性，對於分析生態系統如何影響關係的永續性具有重要意義(Yang et al., 2022)。此外，生態系服務的趨勢如何影響永續發展目標的實現以及不同地區的生態系服務如何影響永續發展目標尚未得到充分解釋(Reyers & Selig, 2020; Yuan & Lo, 2020)。了解生態系服務與永續發展目標之間的相關性，可以為制定和推廣更大的政策以及確定現階段的管理需求提供基礎。因此，進行相關性分析以檢視 Nexus 永續性與生態系統之間的關聯性也是相當重要的。因此本研究結合耦合協調度與權衡關係來共同進行討論。

## 第三章、研究方法



### 3.1 研究區域

臺中市位於臺灣中部，地理位置優越，東鄰南投縣與花蓮縣，北接苗栗縣與新竹縣，南接彰化縣，西臨臺灣海峽。面積為 2,215 平方公里，共劃分為 29 個行政區，擁有約 285 萬的人口，為臺灣第二大城市。臺中的地形變化豐富，從市區的都市核心到丘陵台地，再到東部的高山區域，地勢與地質條件都相當多元，如圖 2、圖 3 所示。

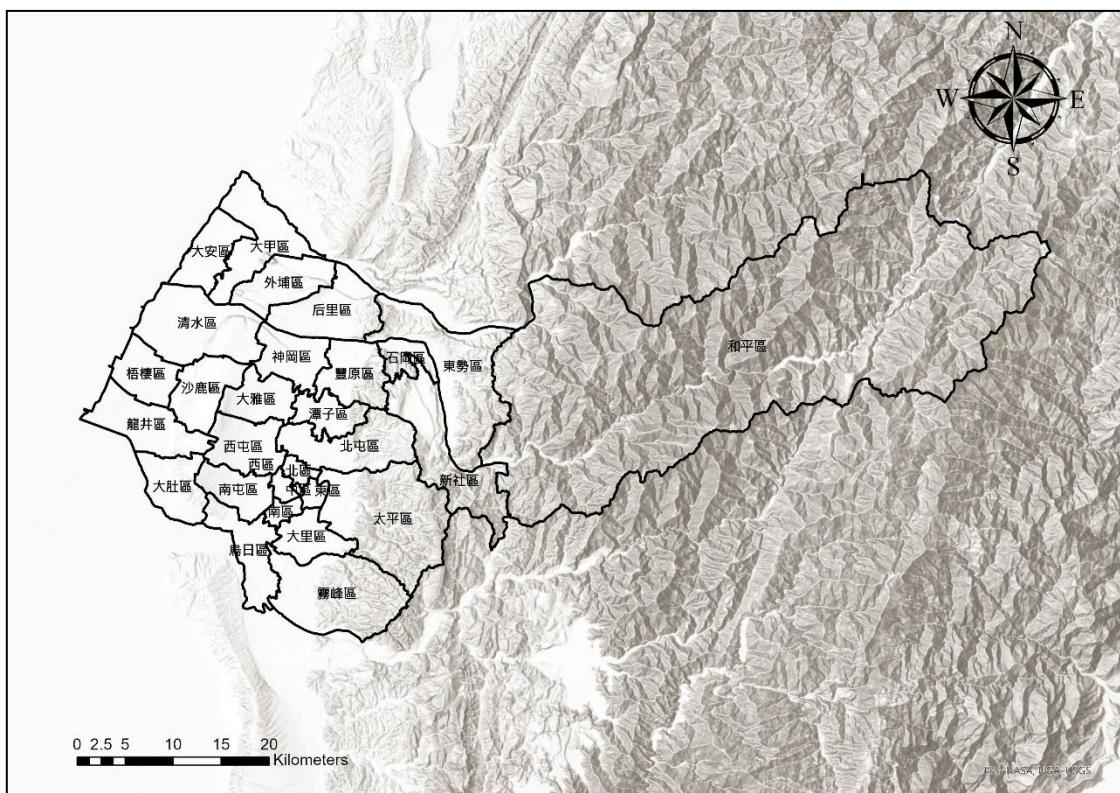


圖 2 臺中市區鄉鎮區圖

以地形來分析，臺中市的平原與山地各占全臺中市面積的一半，其中和平區為主要山地區域，擁有豐富的水資源與水庫，然而，山區的地質結構較為破碎，易受地震與降雨影響而發生崩塌與土石流，不過，同時也擁有豐富的森林資源與高山農業發展潛力。中部臺中盆地由烏溪及大甲溪沖積扇堆積而成，地勢較沿海地區高，是城市經濟活動的核心地帶，人口密集，商業與工業發展興盛。西部沿海地區主要由清水隆起海岸平原和大甲扇狀平原構成，河川分佈較少，主要河流出海口包括烏溪、大甲溪與大安溪，水系發達，土壤肥沃，為生態系統與農業發展提供有利條件。

地質方面，臺中市土壤結構主要由卵礫石構成，具較低的土壤液化風險，提高了抗災能力，如圖 3 所示。

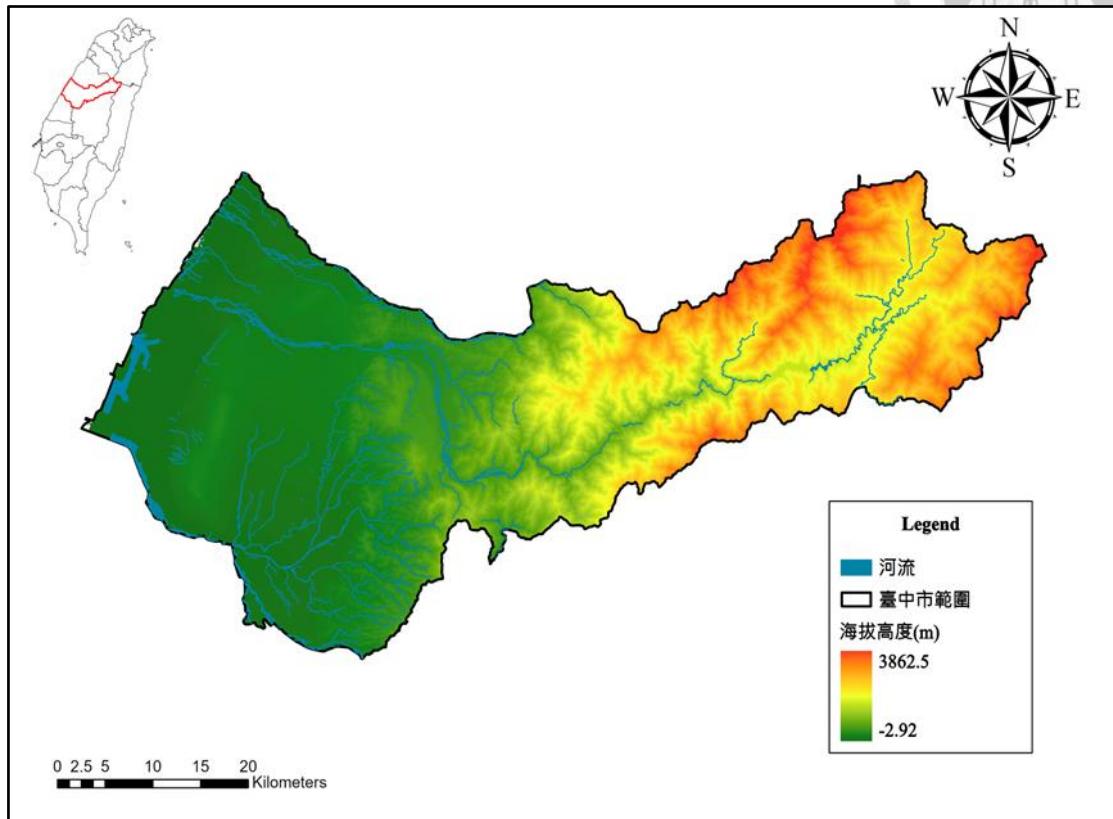


圖 3 臺中市區域高程及範圍圖

土地利用方面，根據 2021 年國土測繪中心調查之結果，臺中市主要以林地為主，占總面積 50.2%，其次為農地(稻作+旱作)占總面積 20.2%，而建地占總面積 18.3%，與農業用地占比相似，與 2014 年相比，在森林用地、農業用地均減少，建築用地則增加了 7%。此外，臺中市農業生產部分稻米產量主要以大甲溪流域之大甲區、清水區及外埔區為最高，果品產量以梨及柿占前二大宗，主要生產區域為和平區、東勢區及新社區為主。產業發展方面，臺中市自戰後歷經農業轉型，逐步發展為以科技型與精緻型產業為主的現代化都市，工業及服務業產值位居全臺前列，2016 年工業產值達 2 兆 4319 億元，服務業產值則達 1 兆 2823 億元，分別排名全國第三與第二。為促進產業升級與國際貿易，臺中市積極發展多個工業與科技園區，包括中港加工出口區、臺中軟體園區及中部科學工業園區，並依託臺中港自由貿易區發展全球經貿鏈結。

本研究使用 2007 年、2014 年及 2021 年國土測繪中心製作的現況調查結果作為土地利用圖的資料來源，依據表 2，將土地利用類型分為七大類，分別為林地、草地、水體、建地、荒地、稻作及旱作，並將這些資料轉換為 100 m×100 m 的網格進行分析，其土地利用分類結果如圖 4、圖 5、圖 6 所示。

表 2 土地利用分類編碼

土地利用分類	2007 年、2014 年代碼及類別	2021 年代碼及類別
林地	02 林地	02 林地
草地	010104(廢耕地) 070201(公園綠地) 090300(草生地)	010302(牧場) 070200(公園綠地廣場) 090200(草生地)
水體	04 水利設施	04 水利設施
建地	010200(水產養殖) 010301(畜禽舍) 010401(溫室) 010402(倉儲設施) 010403(農產品展售場) 010404(其他設施) 03 交通用地 05 建築用地 06 公共用地 07 遊憩用地(不含 070200 公園綠地廣場)	010200(水產養殖) 010301(畜禽舍) 010401(農業生產設施) 010402(農業產銷及加工設施) 03 交通用地 05 建築用地 06 公共用地 07 遊憩用地(不含 070200 公園綠地廣場)
荒地	08 矿鹽用地 09 其他用地(不含 090300 草生地)	08 矿鹽用地 09 其他用地(不含 090200 草生地)
稻作	010101(水田)	010101(水田)
旱作	010102(旱田) 010103(果園)	010102(旱田) 010103(果園)

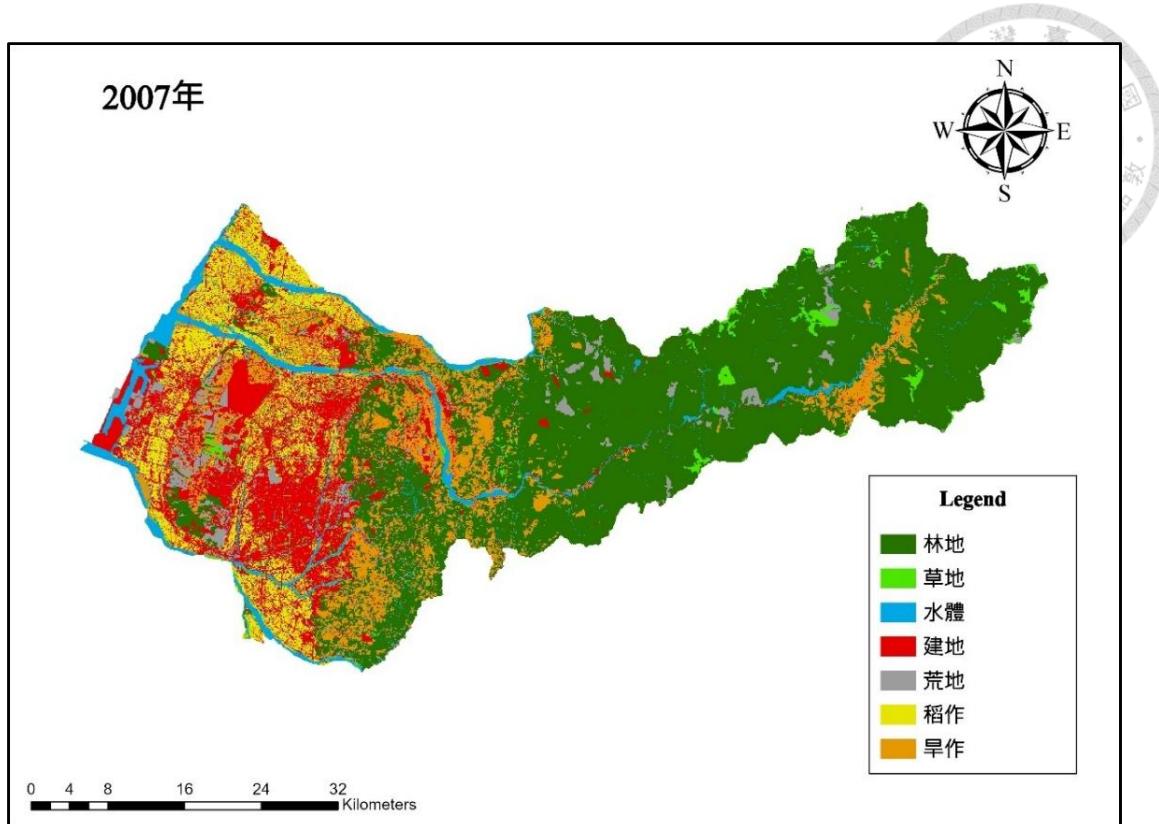


圖 4 臺中市 2007 年土地利用地圖

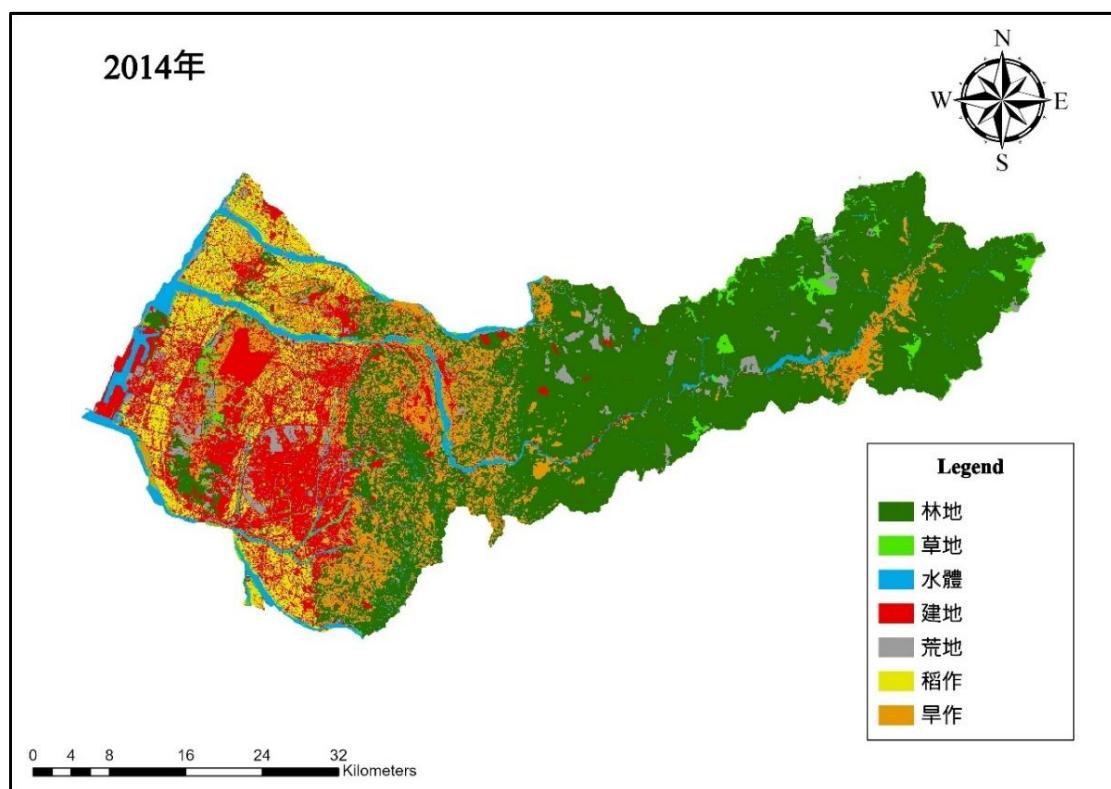


圖 5 臺中市 2014 年土地利用地圖

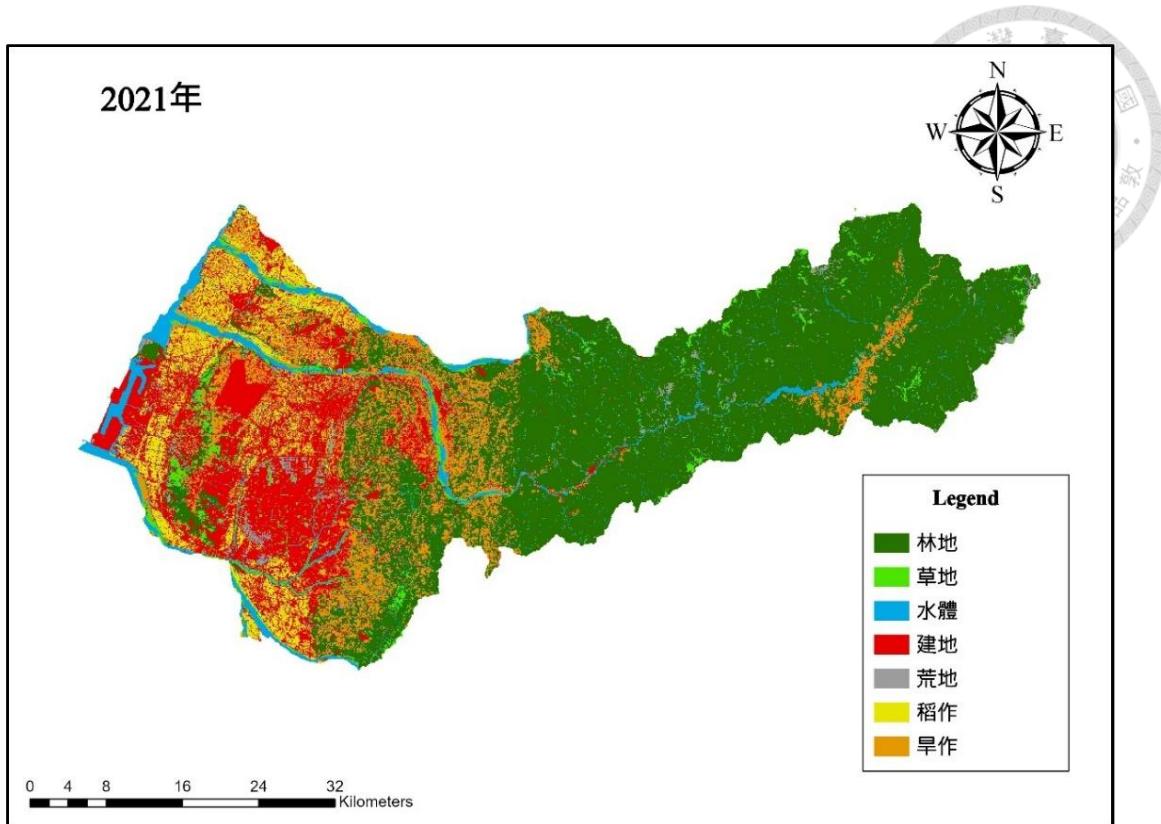


圖 6 臺中市 2021 年土地利用地圖

臺中市土地利用面積及各類別的占比分別如表 3 及圖 7 所示。2007 年林地主要分佈於東部且面積廣大，顯示出臺中東部地區以山林為主，建地則集中分佈在中部和西部平原區，尤其在都市核心地帶顯著，稻作多分佈於平原區域，特別是西部近沿海地區一帶，旱作則多分佈於山區及平原與山地交錯之山坡地區域，而草地與荒地則零星分佈於各地，比例相對較小。到了 2014 年林地面積整體保持穩定，但邊緣地帶的森林可能因建設或農地需求而略有縮減，而建地面積也相較於 2007 年有所增加，凸顯出城市化快速，稻作地範圍略有縮減，尤其是在靠近建地的區域，可能被轉換為建設用途，水體的分佈範圍基本穩定，主要集中於河流或水庫周邊。至 2021 年林地整體分佈依然穩定，農業用地中之稻作又進一步減少，推測可能因為被建設用地取代，而旱作分佈範圍仍穩定，而草地比例相較前兩個年份占比變化不大，但山區零星分佈的地區更為分散，都市區域草地有所增加，而荒地的比例相較於 2007 年及 2014 年縮減了一半，由圖 4 及圖 7 可觀測出大部分位於東部地區的荒地被轉換森林用地使用，而中部和西部平原區的荒地則轉換建地及草地來做使用。

臺中市三個年份間的變化趨勢建地的範圍逐年擴張的趨勢，凸顯臺中市的都市發展快速，稻作的面積逐漸縮小，可能與農地轉為建設用途有關；荒地面積縮小了一半，根據附近土地利用而轉變為該類型用地所使用；林地及旱作地分佈基本保持穩定狀態，主要的河流和水庫範圍幾乎沒有變化。



表 3 臺中市土地利用面積(單位:公頃)

土地利用類型	2007 年	2014 年	2021 年
林地	111273	110104	112806
草地	4921	6400	6936
水體	12613	12489	12511
建地	33768	37963	41651
荒地	13705	11139	6528
稻作	17043	14766	12598
旱作	30660	30862	30952

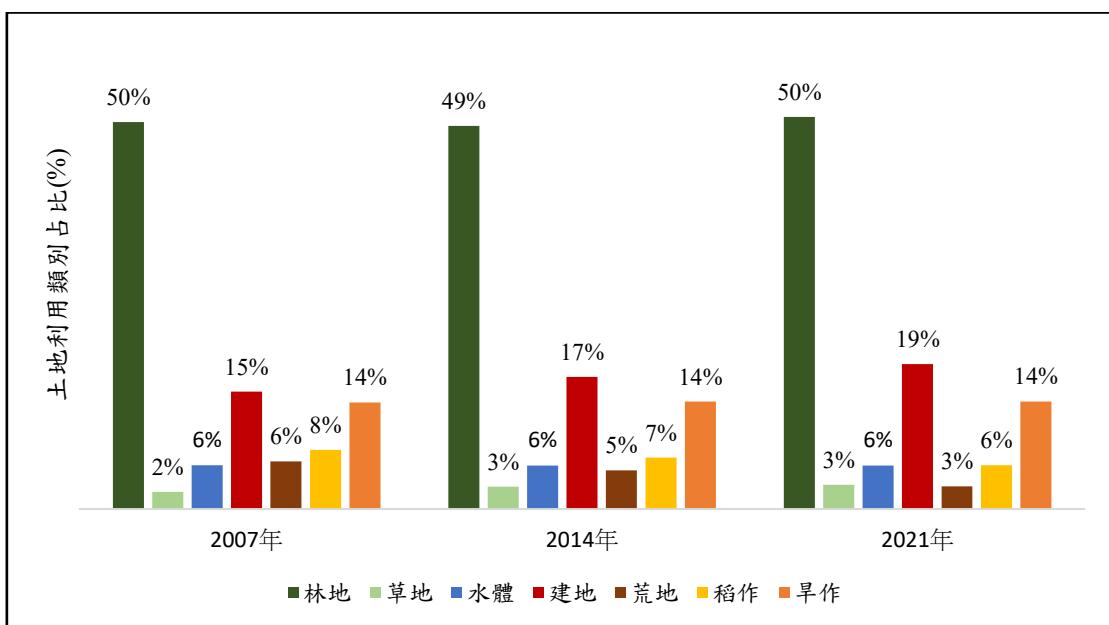


圖 7 臺中市土地利用類別占比圖



## 3.2 生態系服務量化

### 3.2.1 年產水量

InVEST 3.14.0 版模型已在世界各地應用於生態系服務評估，尤其是其產水量模型(Dennedy-Frank, Muenich, Chaubey, & Ziv, 2016)。產水量模型評估是以水量平衡方法作為基礎，假設超過蒸發損失的所有水均會到達流域的出口，應用於網格單元層級在子流域和流域層級的年平均時間步長模擬，評估不同區域對水資源的貢獻，並分析土地利用與土地覆蓋變化對地表水產量與水力發電潛力的影響(Bagstad, Semmens, Waage, & Winthrop, 2013)。此模組是基於年平均降雨量和 Budyko 曲線所建立，再綜合考慮土壤質地、土壤結構、降雨特性、太陽輻射蒸發、地表蒸散、土地利用類型、地形等因子的影響估算研究流域，每個網格單元的年產水量為年降雨量減去年實際蒸散量  $AET(x)$ 。模型演算法如公式(1)：

$$Y(x) = \left(1 - \frac{AET(x)}{P(x)}\right) \times P(x) \quad (1)$$

式中， $Y(x)$ 表示網格單元  $x$  的年產水量 ( $m^3$ )； $AET(x)$  是網格單元的  $x$  之年實際蒸散量 ( $mm$ )， $P(x)$  是網格單元  $x$  的年降雨量 ( $mm$ )。

對於植被土地利用與土地覆蓋(LULC)類型，水平衡中的蒸散部分  $\frac{AET(x)}{P(x)}$  是基於 Budyko 曲線表達式計算，如公式(2)：

$$\frac{AET(x)}{P(x)} = 1 + \frac{PET(x)}{P(x)} - \left[1 + \left(\frac{PET(x)}{P(x)}\right)^\omega\right]^{1/\omega} \quad (2)$$

式中， $PET(x)$  為潛在蒸散量， $\omega(x)$  表徵氣候土壤特性之非物理參數，用來表徵流域的地表特性。兩者具體內容及表達式分別如下公式(3)、(4)：

$$PET(x) = k_c(l_x) \times ET_0(x) \quad (3)$$

式中， $ET_0(x)$  為網格單元  $x$  中的參考蒸散量 ( $mm$ )， $k_c(l_x)$  是與網格單元  $x$  中土地利用與土地覆蓋  $l_x$  相關的植被蒸散係數。 $ET_0(x)$  則反映當地的氣候條件，基於該地點生長的參考植被的蒸散量。 $k_c(l_x)$  很大程度上取決於該網格單元中土地利用與土地覆蓋的植被特徵。 $k_c$  為根據土地利用與土地覆蓋圖每網格單元中的作物或植被類型來調整  $ET_0(x)$  值。

$\omega(x)$  為經驗參數，可表達成線性函數  $\frac{AWC \times N}{P}$ ，其中  $N$  是每年降雨事件的次數， $AWC$  是植物有效含水量的體積。在 InVEST 模型中是使用(Donohue, Roderick, & McVicar, 2012)所提出的公式(4)

$$\omega(x) = Z \times \frac{AWC(x)}{P(x)} + 1.25 \quad (4)$$

其中  $Z$  為經驗常數，反映當地降雨模式以及水文地質特徵，其值範圍通常在 1 到 30 之間。在本研究中，由於研究地區地理位置與周品樺 (2024) 之研究區域均位於台灣中部地區，因此參考其產水量研究結果，將  $Z$  值設定為 1。

$AWC(x)$  為植物有效含水量的體積( $m^3$ )，其定義取決於植物的組織結構及有效根深度，決定土壤中能夠儲存並供應植物的可用水量。它被估計為植物有效含水量 (PAWC) 與根系限制層深度和植被生根深度的最小值的乘積如公式(5)

$$AWC(x) = \text{Min}(\text{Rest. layer. depth}, \text{root. depth}) \times PAWC \quad (5)$$

其中，土壤的根系限制層深度是因物理或化學特性而嚴重阻礙根系穿透的土層深度。植被生根深度通常指植被類型中 95% 根系生物量分佈的深度。PAWC 為植物有效含水量，即田間容水量與凋萎點之差。

而對於其他如開放水域、城市、濕地等土地利用類型，實際蒸發散量直接根據參考蒸散量計算  $ET_0(x)$  並具有由降雨量定義的上限如公式(6)

$$AET(x) = \text{Min}(k_c(l_x) \times ET_0(x), P(x)) \quad (6)$$

其中  $ET_0(x)$  是參考蒸散量，且  $k_c(l_x)$  是每個 LULC 的蒸發散因子。

### 3.2.2 碳儲存

土地上的碳儲存很大程度取決於四個碳庫的大小：地上生物量、地下生物量、土壤有機質和死亡有機質。在 InVEST 模式中的碳儲存和封存模型是根據使用者提供的土地利用類型地圖和分類匯總之中儲存的碳量。地上生物量包括土壤上方的所有活體植物（例如樹皮、樹幹、樹枝、葉子）。地下生物量包括地上生物量的活根系。土壤有機質代表土壤的有機成分，是最大的陸地碳庫。死亡有機質包括直立和躺臥的死木以及枯枝落葉。

此模型利用土地利用和土地覆蓋分類圖以及碳庫中儲存的碳量，估算一段時間內，地塊中儲存的淨碳量以及剩餘碳庫中封存碳的市場價值。在本研究中，使用

碳儲存用於估算特定區域的碳儲存量。具體來說，生態系統的碳儲存量是透過將每種土地利用與覆蓋類型的四個碳庫（地上、地下、土壤和死亡有機質）之平均碳密度乘以其相應的面積來進行計算，計算如公式(7)、公式(8)

$$C = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead} \quad (7)$$

$$C_{total} = \sum_{k=1}^n A_k \times C_k, (k = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

其中， $C$  是每種土地覆蓋類型單位面積的總碳儲量， $C_{above}$  是地上生物量， $C_{below}$  是地下生物量， $C_{soil}$  是土壤有機質碳存量， $C_{dead}$  是死亡有機質碳存量， $A_k$  是每種土地覆蓋類型的面積， $C_k$  是網格單元的總碳儲量。

為了更加精準的模擬出現地碳儲存量，本研究利用農業試驗所提供的臺中市有機碳分佈圖，計算各地區平均每公頃的碳總量。再依據《Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories》報告書(IPCC, 2006) 中的土地利用類型碳庫比例進行分類計算，計算方式首先將 SOC 圖層匯入 ArcMap，找出每個網格屬於哪種土地利用，再將屬性資料 table 匯出至 excel 於 excel 中套用公式計算各土地利用的碳匯儲存總量，再除以該類土地利用的總網格數(取平均的概念)。最後以原始比例(如下圖)去做推算，即可得出各欄為新的數值，驗證後的新碳庫。並得出表 4 後，最終生成研究區的碳儲存地圖。

表 4 土地利用類型之碳庫量(Mg/ha)

土地利用類型	地上生物量 $C_{above}$	地下生物量 $C_{below}$	土壤有機質 $C_{soil}$	死亡有機質 $C_{dead}$
森林	82.8	19.9	28.6	1.7
草地	2.3	9.3	86.5	5.2
水體	0	0	0	0
建地	0	0	0	0
荒地	0	0	0	0
稻作	27.1	5.4	60.6	3.6
旱作	28.6	5.7	64	3.8



### 3.2.3 作物生產

InVEST 作物生產模型基於百分位產量模型，作物產量百分位模型為利用現有數據、百分位摘要及觀測產量來估算出 175 種作物的產量，這些觀測數據源自糧農組織及各國對於這 175 種作物的資料集，如營養資訊。百分位產量模型可用於探索不同集約化水平，列出每種作物在其氣候區內觀測到的產量資料中第 25、50、75 和 95 個百分位數的產量。

本研究將農地劃分為稻作及旱作兩種土地利用類型，再根據 111 年臺中市各作物的產量紀錄發現，水稻為主要作物，其次為梨樹。因此，我們主要選擇這兩種作物作為生產指標進行模擬分析。在稻作方面，我們以稻米作為代表作物；在旱作方面則選取在臺中市農產品總產量中占比最大的果品—梨樹作為代表作物，進行作物產量模擬，並採用百分位產量模型之結果來進行後續的研究成果分析。

#### 作物生產驗證

收集研究年份的臺中市統計通報的實際產量數據，並將其與 InVEST 作物生產模型輸出之模擬產量的各百分位結果透過公式(9)進行誤差計算，通過比較稻米與梨樹的實際產量，確定誤差最小的百分位數產量，並將其作為本研究的作物生產數據，用於後續研究分析。

$$\text{誤差} = \frac{\text{模擬產量} - \text{實際產量}}{\text{實際產量}} \times 100\% \quad (9)$$

### 3.2.4 營養鹽留存

在 InVEST 模型中，養分輸送模型 (Nutrient Delivery Ratio, NDR) 提供了一種能夠量化空間上的相對養分輸出和保留，並反映不同變化情境下養分輸出和保留的變化。此模型使用簡單的質量平衡方法來描述從流域高地流入河流的非點源營養物質(如總氮和總磷)在空間中的運動，透過經驗關係表示營養物質的長期、穩定狀態流動。估計的養分負荷表示來自不同來源流經地表和地下的養分總量，為了更準確地調整養分負荷，模型根據土地覆蓋特徵、地形特徵和徑流估計，計算透過地表和地下流到達河流的養分比例，定義為養分輸送比(Hamel, Chaplin-Kramer, Sim, & Mueller, 2015)。在流域出口，養分輸出以每年每單位面積的養分公斤數 (如總氮或總磷) 計算，並由所有網格單元的貢獻總和得出，需注意的是，養分輸送模型與



其他水質 InVEST 模型類似，均不考慮河流養分處理過程，並假設養分一旦到達河流，就會到達流域出口 (De Jesus Crespo, Valladares-Castellanos, Mihunov, & Douthat, 2023; Sharp, Tallis, & Ricketts, 2015)。營養鹽輸出量及總量計算如公式(10)、(11)所呈現：

$$x_{exp_i} = load_{surf,i} \times NDR_{surf,i} + load_{subs,i} \times NDR_{subs,i} \quad (10)$$

$$x_{exp_{tot}} = \sum_i x_{exp_i} \quad (11)$$

式中， $x_{exp_i}$  指每網格單元的營養鹽輸出量 (Kg)， $load_{surf,i}$  和  $load_{subs,i}$  定義為地表逕流及地下水輸送的營養鹽負荷量， $NDR_{surf,i}$  和  $NDR_{subs,i}$  為地表逕流輸送及地下水輸送之養分輸送比例。 $x_{exp_{tot}}$  指一個流域一年內的養分輸出總量 (Kg)，是將各網格單元的養分輸出加總的結果。本研究計算所需之參數：森林、草地、水體、建地、荒地為參考(蕭戎雯, 2013)之研究所得，而稻作及旱作則是根據 InVEST 模型給的 defalt 來進行設置，將一般農業的數據視為稻作的參數；旱作的參數選擇在 defalt 中與旱作最相近的茶葉，如表 5 所呈現。

表 5 土地利用類型之營養鹽參數表

土地利用類型	氮營養鹽			磷營養鹽	
	排放量 (kg/ha-year)	留存比例	地下輸送比	排放量 (kg/ha-year)	留存比例
森林	1.6	0.8	0	0.25	0.8
草地	1	0.5	0	0.1	0.5
水體	3.5	0	0	0.5	0
建地	3.5	0	0	0.5	0
荒地	3.5	0.1	0	0.5	0.1
稻作	27	0.25	0	3.57	0.48
旱作	3.3	0.4	0	2.47	0.48

### 3.2.5 沉積物留存

InVEST 中沉積物留存模型 (Sediment Delivery Ratio, SDR) 是評估土壤侵蝕的重要工具，可衡量流域控制土壤流失的能力，其核心指標為流域出口的輸沙量與整

個流域內土壤侵蝕總量的比值。該模型能生成沉積物及其向河流輸送的空間分佈圖。本研究採用此模型評估流域內的土壤侵蝕狀況，並量化其對生態系統服務的影響。首先，利用通用土壤流失方程式（USLE）計算每個網格單元的年平均土壤流失量，如公式(12)：

$$USLE = R_i \times K_i \times LS_i \times C_i \times P_i \quad (12)$$

其中，USLE年平均土壤流失量( $tons \times ha^{-1} \times yr^{-1}$ )， $R_i$ 降雨沖蝕指數( $MJ \times mm(ha \times hr \times yr)^{-1}$ )， $K_i$ 土壤沖蝕指數( $ton \times ha \times hr(MJ \times ha \times mm)^{-1}$ )， $LS_i$ 坡長和坡度因子（無量綱）， $C_i$ 植被覆蓋和作物管理因子（無量綱）， $P_i$ 水土保持處理因子（無量綱）。

模型輸出包括兩項指標：避免輸沙量和避免侵蝕量。本研究選用避免侵蝕量作為土壤保持能力的指標，並採用以下公式(13)計算每個網格單元的避免侵蝕量：

$$AER_i = RKLS_i - USLE_i \quad (13)$$

式中 $AER_i$ 是網格單元*i*上的避免侵蝕量， $RKLS_i$ 是不考慮C和P因子的土壤流失量， $USLE_i$ 是考慮了C和P因子的土壤流失量。 $RKLS_i$ 與 $USLE_i$ 間的差異反映了植被覆蓋與良好管理措施在減少土壤侵蝕方面的效益。

本研究計算所需之參數為參考(蕭戎雯, 2013)之研究所得，而稻作及旱作則是根據(P Chen, Feng, Mannan, Chen, & Ullah, 2019)之參數進行設定，詳細土地利用類型之沉積物留存參數表如表 6 所示。

表 6 土地利用類型之沉積物留存參數表

土地利用類型	覆蓋與管理因子 C	水土保持管理因子 P
	USLE_C	USLE_P
森林	0.01	1
草地	0.01	1
水體	1	1
建地	0.01	1
荒地	1	1
稻作	0.25	1
旱作	0.22	1



### 3.2.6 都市降溫

InVEST Urban Cooling 模型基於陰影、蒸發散和反照率計算每網格單元的冷卻能力  $CC_i$  (cooling capacity) 指數。此方法是基於 Zardo (2017) 和 Kunapo (2018) 提出的指數，其中加入了反照率。本研究應用 InVEST Urban Cooling 來分析熱調適指數 HMI 的空間分佈和變化，此模型先計算冷卻能力  $CC_i$  並根據  $CC_i$  產出 HMI。 $CC_i$  是使用公式(14)在網格單元層級計算，產生 0 到 1 之間的值，為結合了  $CC_i$  指數中的陰影(shade)、參考蒸發散(ETI)和反照率(albedo)三項因子。

$$CC_i = 0.6 \times shade + 0.2 \times albedo + 0.2 \times ETI \quad (14)$$

式中，shade 為樹蔭和樹冠比例 (高度  $\geq 2$  m)，取值範圍為 0~1；albedo 為反照率，是土地利用與土地覆蓋類型反射的太陽輻射的比例，範圍從 0 到 1，1 表示太陽輻射的最大反射率；ETI 為蒸發散指數，即潛在蒸散量的歸一化值，取值範圍為 0 ~ 1。建議權重為 0.6、0.2 及 0.2 根據經驗數據，反映了陰影的影響高於蒸發散及反照率。其中，ETI 的計算方法為公式(15)。

$$ETI = \frac{K_c \times ET_0}{ET_{max}} \quad (15)$$

式中， $ET_0$  為參考蒸散量 (mm/day)， $ET_{max}$  為區域內最大蒸散量 (mm/day)， $K_c$  為作物係數。

#### 熱調適指數(大型綠地的影響)：

為了考慮大於 2 公頃綠地對於其周圍環境的冷卻影響，InVEST Urban Cooling 將  $CC_{park_i}$  計算為綠地和目標網格單元  $CC_i$  值的距離加權平均值。使用公式(16)、(17) 計算綠地面積圍繞每個  $GA_i$  以及每個  $CC_{park_i}$  所提供的  $CC_i$ ，其中  $GA_i$  是每網格單元周圍搜尋距離內的綠色區域面積，所有計算都是在逐個單元的基礎上執行，因此精度會受到空間解析度的影響。

$$GA_i = cell_{area} \times \sum_{j \in d \text{ radius from } i} g_j \quad (16)$$

$$CC_{park_i} = \sum_{j \in d \text{ radius from } i} g_i \times CC_j \times e^{\left(\frac{-d(i,j)}{d_{cool}}\right)} \quad (17)$$

等式 16 中， $cell_{area}$ ，當網格單元之土地利用為植被及提供降溫之服務時，將該土

地利用之  $g_i$  設定為 1，如果不是則設為 0， $d(i, j)$  是網格單元之間的距離  $i$  和  $j$ ， $d_{cool}$  是大於 2 公頃綠地具有冷卻效果的距離，且  $CC_{park_i}$  是歸因於綠色區域的  $CC_i$  值的距離加權平均值。方程式(17)中  $CC_j$  為網格單元  $j$  的冷卻能力， $d_{cool}$  為冷卻距離， $d(i, j)$  為位於冷卻距離內的單元  $i$  和  $j$  之間的距離，指示網格單元是否為綠色區域。如果綠色區域不影響冷卻，那麼 HMI 和  $CC_i$  是相同的。然而，如果  $d_{cool}$  內的綠地面積超過 2 公頃，那麼 HMI 就是計算出的  $CC_{park_i}$ ，如公式(18)所示。

$$HMI = \begin{cases} CC_i & \text{if } CC_i \geq CC_{park_i} \text{ or } GA_i < 2ha \\ CC_{park_i} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (18)$$

氣溫估計：

為了估計整個城市的熱減少量，模型採用都市熱島強度  $UHI_{max}$ 。使用者可從當地文獻或全球研究中獲取  $UHI$  值。

無空氣混合時的空氣溫度  $T_{air_{nomir}}$ ， $i$  每個網格單元的計算如公式(19)：

$$T_{air_{nomir}}, i = T_{air,ref} + (1 - HM_i) \times UHI_{max} \quad (19)$$

式中  $T_{air,ref}$  是鄉村參考溫度， $UHI_{max}$  是城鄉差距的最大幅度。由於空氣混合，這些溫度在空間上呈現均勻分佈。實際空氣溫度（混合） $T_{air}$ ，是由  $T_{air_{nomir}}$  使用具有核半徑的高斯函數  $r$  推導而來，該半徑由使用者定義。對於每個感興趣的區域，計算其平均溫度和溫度異常值  $(T_{air,i} - T_{air,ref})$ 。

### InVEST Urban Cooling 參數驗證

為了使模擬更接近研究區域的實際情況，本研究透過交通部中央氣象局的氣象測站實際資料進行研究區域內的模式參數檢定。其中，鄉村測站的溫度  $T_{air,ref}$  和研究區域內城鄉差距最大的數值  $UHI_{max}$  是使用實際觀測資料，然而，2007 年臺中市內僅設有雨量站，未設置任何氣象測站，因此，本研究為補足 2007 年鄉村測站與  $UHI_{max}$  資料，本研究採用 TCCIP 網格化觀測日資料中的臺中市最高溫作為溫度數據來源，並選取選定測站周邊範圍內的網格點數據，計算其平均值，以代表該測站的溫度資料，以利進行後續的模擬，其餘可調整的參數包括：陰影權重 ( $\omega_s$ )、參考蒸發散權重 ( $\omega_e$ )、反射率權重 ( $\omega_a$ )、綠地最大降溫距離 ( $d_{cool}$ )、以及空氣溫度混合距離 ( $r$ )，這些參數的調整將有助於提升模擬結果的準確性，使其更能反映研究區域的實際環境特徵，可以根據使用者手冊建議的參數設定，陰影權重為

0.6；反射率權重為 0.2；參考蒸發散權重為 0.2，綠地最大降溫距離設定為 450 公尺，空氣溫度混合距離介於 500 至 600 公尺之間。在本研究中則是參考汪中安(2022)的參數研究結果，採用調整後的參數值  $\omega_s = 0.618$ ;  $\omega_a = 0.218$ ;  $\omega_e = 0.164$ ， $d_{cool} = 431.545$  公尺，以及  $r = 897.565$  公尺，接著，在上述基礎上對參數設定進行  $\pm 10\%$  的隨機變動，產生 1000 組隨機參數組合，並使用蒙地卡羅方法(Monte Carlo method)進行模式運算，將模式輸出之空氣溫度圖(T\_air.tif) 與氣象測站實際觀測資料的誤差進行比較，並以方均根誤差(Root mean square error, RMSE)、均方誤差 (Mean Squared Error, MSE) 作為驗證指標，篩選出誤差最小的參數組合，再以 2007 年、2014 年及 2021 年的土地利用搭配 2007 年、2014 年、2015 年及 2021 年四組夏季平均溫與模式輸出之結果進行驗證，確認其參數可靠度。

### 3.3 热點分析

標準化 (Normalization) 是一種數據處理技術，將具有不同單位或量綱的數據轉換到統一的範圍內，以提升數據的可比性和模型的適用性。本研究透過標準化方法，將各生態系服務系統原始值壓縮到 0 至 1 的範圍，以便進行不同生態系服務之間的熱點分析與比較。

InVEST 模式量化結果中，碳儲存、作物生產、沉積物留存、產水量及都市降溫屬於正面指標，代表其數值越大，生態系服務越佳。為統一這些指標的尺度，本研究採用標準化公式(21)進行數據處理：

$$ES_{std(i)} = \frac{ES_i - \min(ES)}{\max(ES) - \min(ES)} \quad (21)$$

而另一方面，氮、磷營養鹽輸出為負面指標，數值越小表示生態系對氮磷營養鹽的留存能力越強，因此對其進行逆標準化處理，如公式(22)：

$$ES_{std(i)} = \frac{\max(ES) - ES_i}{\max(ES) - \min(ES)} \quad (22)$$

此處， $ES_{std(i)}$  示第  $i$  個網格單元的生態系服務原始值， $\min(ES)$  和  $\max(ES)$  分別為該指標的最小值和最大值。通過標準化、逆標準化處理，所有指標均被轉換到 0 至 1 的統一範圍，便於進行跨指標的比較與綜合分析，越接近 1 表示越可提供較好的生態系服務。



### 3.3.1 空間自相關分析

區域型局部空間關聯指標 (Local Indicators of Spatial Association, LISA)，是一種分析空間數據集聚模式的重要工具，主要功能是識別於不同空間位置上可能出現的空間關聯模式或集聚現象，進而揭示數據之間的空間異質性特徵。該方法基於對每個空間點與其鄰近地區的空間型態進行比較，判斷其型態是否相似或不同，從而界定空間上的群聚地區，通過 LISA，可以生成區域型相關分佈圖，直觀展示各空間單元的集聚特性及其與鄰近地區的相互作用。LISA 的理論基礎源於 Global Moran I 的概念，通過計算每個空間點的 Moran 指標，提供細緻的區域層級的空間相關性信息。其統計量的計算如公式(20) (Anselin, 1995)所示：

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x}) \sum_j w_{ij}(x_j - \bar{x})}{\sum_j (x_i - \bar{x})^2} = \frac{n z_i \sum_j w_{ij} z_j}{z^T z} = z_i^T \sum_j w_{ij} z_j^T \quad (20)$$

式中  $z_i^T$  和  $z_j^T$  是觀測值的平均值標準化觀測值。 $w_{ij}$  是研究區域內空間單元  $i$  與  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) 的空間相鄰權重矩陣， $w_{ij} = 1$  表示  $i$  與  $j$  相鄰，而  $w_{ij} = 0$  表示  $i$  與  $j$  不相鄰。

區域型相關散佈圖是一種探索空間關聯性的重要工具，此散佈圖的橫軸代表觀測值，而縱軸則是引入空間權重的鄰近觀測值。散佈圖透過散點的分佈模式，形象地展示空間關聯性，並依據散點位置分為四個象限，對應不同的局部空間關聯模式(圖 8)：第 1 象限 (H-H, 高-高聚集)：表示觀測值高的區域單元，被觀測值高的區域所環繞的空間關係。第 2 象限 (L-H, 低-高聚集)：表示觀測值低的區域單元，被觀測值高的區域環繞的空間關係。第 3 象限 (L-L, 低-低聚集)：表示觀測值低的區域單元，被觀測值低的區域環繞的空間關係。第 4 象限 (H-L, 高-低聚集)：表示觀測值高的區域單元被觀測值低的區域環繞的空間關係。本研究區域型局部空間關聯指標 LISA 進行各年份之生態系服務熱點分析，並將其結果中 High-High 的區域定義為生態系服務熱點區域。

第二象限 (L-H)	第一象限 (H-H)
第三象限 (L-L)	第四象限 (H-L)

圖 8 區域型相關分佈範例

### 3.4 水-能源-糧食鏈結永續性指標

水-能源-糧食鏈結 (WEF Nexus) 是一個複雜且相互依賴的系統，任何一個子系統的變化都可能引發其他兩個子系統產生顯著影響。本研究採用 T. Ding et al. (2023)建立的 Nexus 永續性評估指標體系，來量化和評估鏈結系統的永續性。表 7 從水、能源和糧食三個子系統的永續性角度，共選取 18 個指標進行分析，每個子系統各包含 6 個指標，正負指標不僅反映了水、能源和糧食資源的供給與消耗狀況，除此之外這些指標還展示了三個子系統之間的相互關聯性，以全面體現鏈結的概念。本研究所選取的 18 個指標均是考慮到資料的可取性而進行選擇。

指標權重的確定方法主要分為兩類，即主觀方法如層次分析法 (AHP) 以及以熵權法為代表的客觀方法(Pengyu Chen, 2021; Tzeng & Huang, 2011)，本研究採用客觀的熵權法來進行水-能源-糧食鏈結永續性指標的量化。

表 7 WEF Nexus 永續性指標 T. Ding et al. (2023)

子系統	指標	單位	影響 (+/-)	參考來源
水子系統	人均水資源	$m^3/person$	+	Q. Wang, Li, He, Li, and Wang (2018); Y. Wang, Xie, Qi, He, and Bo (2022)
	人均用水量	$m^3/person$	-	Hui, Yiwen, Zongyan, Yigong, and Dawei (2021); Jia, Cai, Chen, and Zeng (2018)
	單位 GDP 用水量	$m^3/\$10000 NTD$	-	Yi et al. (2020)
	工業額外產值用水量	$m^3/\$10000 NTD$	+	L. Sun et al. (2022)
	水資源利用率	%	+	L. Sun et al. (2022); J. Zhang, Wang, Pradhan, Zhao, and Fu (2022)
	廢(污)水量	10000 tons	-	Q. Wang et al. (2018)
能源子系統	人均能源消耗量	Tons of standard coal/ person	-	Hui et al. (2021); L. Sun et al. (2022)
	單位 GDP 能源消耗量	tons of standard coal / GDP\\$1000 NTD	-	Hu, Ma, Huang, and Guo (2021); Zhi, Chen, Wang, Liu, and Zhu (2020)
	單位 GDP 碳排放量	tons of standard coal / \\$10000 NTD	-	Chaudhary, Gustafson, and Mathys (2018)
	工業固體廢棄物產生量	10,000 tons	-	Q. Wang et al. (2018)
	電氣化比例	kwh/ tons of standard coal	+	L. Sun et al. (2022)
	科技投資佔 GDP 的百分比	%	+	Q. Wang et al. (2018); Zhi et al. (2020)
糧食子系統	人均糧食種植面積	ha/person	+	Zhi et al. (2020)
	糧食種植面積比例	%	+	L. Zhao, Liu, and Sun (2021)
	人均糧食生產量	ton/person	+	Putra, Pradhan, and Kropp (2020); Y. Wang et al. (2022); Yi et al. (2020)
	單位面積糧食生產量	ton/ha	+	L. Zhao et al. (2021)
	化肥負荷量	ton/ $km^2$	-	Hui et al. (2021); Nadaraja, Lu, and Islam (2021)
	農業產值比重	%	+	Saladini et al. (2018)



### 3.4.1 水子系統

#### a. 人均水資源(Per capita water resources)

本研究之平均降雨量使用臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫(TCCIP)所提供之臺中雨量測站數據，結合地理資訊系統 ArcGIS 中 Kriging 插值法，推估空間降雨量分佈。依據 Kriging 插值結果按照各行政區劃分進行計算，計算出各行政區的平均降雨量。由於部分水資源因蒸發散及入滲至地表而無法被人類使用，因此需要在乘上逕流率來對總水資源量進行調整，本研究參考其他相關文獻，將其逕流率假設為 0.7。接著具體計算流程如下：將各行政區的平均降雨量與行政區面積相乘，再乘以逕流率，即可獲得行政區由降雨所得出的水資源量。最後將調整後的水資源量除以各行政區的人口數，即可計算出人均水資源量，其公式為(23)。

$$\text{人均水資源} = \frac{(\text{平均降雨量} \times \text{行政區面積} \times \text{逕流率})}{\text{行政區人口數}} \quad (23)$$

#### b. 人均用水量(Per capita water consumption)

本研究根據經濟部水利署各項用水統計年報，將用水量分為生活用水、工業用水與農業用水三部分，並以此作為後續用水量計算的依據。生活用水部分的計算假設各行政區人均用水量相同，使用行政區人口比例乘以臺中市年生活用水量，以推算各行政區的生活用水量。工業用水部分的計算假設每家工廠的工業用水量相同，根據各行政區工廠數量比例分配臺中市總工業用水量，從而得出各行政區的工業用水量。農業用水部分假設農地的單位需水量相同，依據各行政區的農地面積比例分配臺中市農業用水量，計算出各行政區的農業用水量。最後，將各行政區的生活用水量、工業用水量和農業用水量加總後，再除以行政區的人口數，即可計算出人均用水量，公式如(24)。

$$\text{人均用水量} = [(\text{生活用水量} \times \text{行政區人口比例}) + (\text{工業用水量} \times \text{工廠數量比例}) + (\text{農業用水量} \times \text{農地面積比例})] / \text{行政區人口數} \quad (24)$$

#### c. 單位 GDP 用水量(Water consumption per unit of GDP)

本研究將單位 GDP 用水量定義為人均用水量與人均 GDP 的比值，如公式 (25)：

$$\text{單位 GDP 用水量} = \frac{\text{用水量}}{\text{GDP}} \quad (25)$$

國內生產總值 (Gross Domestic Product, GDP) 有多種計算方式如產業法、支出法和收入法。本研究使用支出面法 (Expenditure Approach) 來進行計算，其公式 (26)：

$$GDP = \text{民間消費支出} + \text{固定投資} + \text{政府消費支出} + \text{淨出口} \quad (26)$$

將民間消費支出公式(27)、固定投資公式(28)、政府消費支出公式(29)、淨出口公式(30)相加，即可得出總 GDP。

$$\text{民間消費支出} = \text{戶籍登記戶數} \times \text{平均每戶經常性支出} \quad (27)$$

$$\text{固定投資} = \left( \frac{\text{臺中市工廠全年固定資產投資金額}}{\text{臺中市製造業生產總額}} \right) \times \text{臺中市全產業生產總額} \quad (28)$$

$$\text{政府消費支出} = \text{全臺政府消費支出} \times \left( \frac{\text{全臺歲出}}{\text{臺中市歲出}} \right) \times \left( \frac{\text{行政區人口數}}{\text{總人口數}} \right) \quad (29)$$

$$\text{淨出口} = (\text{全臺商品輸出} - \text{全臺商品輸入}) \times \left( \frac{\text{行政區全年營業支出}}{\text{全國營業支出}} \right) \quad (30)$$

式中民間消費支出計算方式為各行政區之戶籍登記戶數乘以臺中市平均每戶經常性支出所得。固定資本投資涵蓋製造業及非製造業，但因缺乏非製造業的相關數據，本研究僅針對製造業的產值進行計算。在計算過程中假設所有產業的固定投資與其產值之間存在正相關。首先，計算製造業的產值在整體產業產值中的比例，並將臺中市工廠的全年固定資產投資除以該比例，以推算整體產業的固定資產投資額。關於政府的消費支出，假設其與歲出及人口數量呈正相關。本研究首先計算臺中市的歲出佔全台灣總歲出的比例，並將此比例乘以全國的政府消費支出，再利用各行政區人口比例分配得出各行政區的政府消費支出。淨出口數據則是基於全國的統計，計算全臺商品的淨出口，即全臺商品輸出總額減去輸入總額。本研究假設淨出口金額與全年營業額成正比，各行政區的全年營業額占全國總營業額的比例乘以全臺淨出口金額，得出各行政區的淨出口金額。

#### d. 工業額外產值用水量(Water consumption of industrial added value)

本研究工業額外產值用水量的計算方式為將工業用水量除以工業額外產值，公式如(31)。由於缺乏非製造業的相關數據，因此本研究主要聚焦於製造業的產值計算。工業額外產值被定義為各行政區工廠的營業收入與支出之間的差額。這些數



據，包括工業額外產值、工業營業收入和工業營業支出之資料，均來自經濟部的工廠校正及營運調查統計表。由於此調查為每五年一次，因此缺乏 2021 年的相關數據，將使用 2020 年的數據替代。

$$\text{工業額外產值用水量} = \frac{\text{工業用水量}}{(\text{工業營業收入} - \text{工業營業支出})} \quad (31)$$

e. 水資源利用率(Utilization ratio of water resources)

本研究中，水資源利用率是通過將先前所計算得出的人均用水量除以人均水資源所得，具體如公式(32)。

$$\text{水資源利用率} = \left( \frac{\text{人均用水量}}{\text{人均水資源}} \right) \times 100\% \quad (32)$$

f. 廢(污)水量(Industrial wastewater discharged)

本研究之廢(污)水量是使用由環境部所提供之 2007、2014、2021 年臺中市各鄉鎮工業廢污水排放量統計資料。

### 3.4.2 能源子系統

a. 人均能源消耗(Per capita energy consumption)

本研究假設能源消耗量與用電量之間具有正相關性。首先，根據經濟部能源署統計資料獲取臺灣平均每人能源消費量，並將其乘以全臺總人口數，再依據各行政區的售電比例分配全臺能源消耗量，以計算該行政區的總能源消耗量。售電比例的計算方法為該行政區售電量除以全臺售電量。最後，將該行政區的總能源消耗量除以該行政區的人口數，即可得出人均能源消耗量，具體如公式(33)。

$$\text{人均能源消耗} = \frac{\text{臺灣人均能源消費量} \times \text{全臺總人口} \times \text{行政區售電比例}}{\text{行政區人口數}} \quad (33)$$

b. 能源密集度(Energy consumption intensity)

將能源消耗量除以行政區的總 GDP，即可計算出該行政區的能源密集度，具體如公式(34)。

$$\text{能源密集度} = \frac{\text{能源消耗量}}{\text{GDP}} \quad (34)$$

c. 碳強度(Carbon Intensity)

$\text{CO}_2$  排放是由工業排放、民生排放和能源排放構成。將民生排放與工業排放相加後，再除以行政區的總 GDP，即可計算出該行政區的碳強度。本研究將工業排放與能源排放定為各工廠範疇一（直接排放）和範疇二（間接排放）排放量的總和，而民生排放則是根據人口數和  $\text{CO}_2$  排放的線性公式計算得出，具體如公式(35)。

$$\text{碳強度} = \frac{\text{碳排放}}{\text{GDP}} \quad (35)$$

d. 工業固體廢棄物(Industrial Solid Waste)

本研究透過經濟部工廠校正及營運調查中獲得各行政區的全年營業支出資料，計算出其全年營業支出占臺中市總營業支出的比例，然後將該比例乘以臺中市申報的事業廢棄物產生量，即可得出各行政區的工業固體廢棄物的數據。在本研究中，假設事業廢棄物的產生量與全年營業支出之間呈正相關，具體如公式(36)。

$$\text{工業固體廢棄物} = \text{申請事業廢棄物產生量} \times \left( \frac{\text{行政區全年營業支出}}{\text{臺中總全年營業支出}} \right) \quad (36)$$

e. 電氣化比例(Degree of electrification)

電氣化比例是由電力消費量與能源消費量的比值計算得出公式(37)。其中，電力消費量的計算方法為歷年售電量乘以行政區的用電比例得出；而能源消費量則是通過將臺灣人均能源消費量乘以該行政區的人口數進行推算。

$$\text{電氣化比例} = \frac{\text{電力消費量}}{\text{能源消費量}} \quad (37)$$

f. 科技投資佔 GDP 比重(Technology investment as a percentage of GDP)

科技投資佔 GDP 的比重計算公式(38)為是由研究與發展經費除以行政區的總 GDP 計算得出。其中研究與發展經費資料是由經濟部工廠校正及營運調查網站獲得。

$$\text{科技投資佔 GDP 比重} = \left( \frac{\text{研究與發展經費}}{\text{GDP}} \right) \times 100\% \quad (38)$$



### 3.4.3 糧食子系統

#### a. 人均種植面積(Per capita grain-sown area)

本研究人均種植面積為將耕地面積與行政區人口數相除所得，計算公式如(39)。其中耕地面積資料來源為各年分臺中市政府農業局年報-農林漁牧，行政區人口數資料來源為臺中市政府民政局人口管理統計平台。

$$\text{人均種植面積} = \frac{\text{耕地面積}}{\text{行政區人口數}} \quad (39)$$

#### b. 糧食種植面積比例(Proportion of grain-sown area)

本研究糧食種植面積比例為耕地面積與行政區面積相除所得，計算公式(40)。

$$\text{糧食種植面積比例} = \frac{\text{耕地面積}}{\text{行政區面積}} \quad (40)$$

#### c. 人均糧食生產量(Per capita food production)

糧食生產量由稻米、普通作物、特用作物、蔬菜、果品生產量加總而成，再將各行政區的糧食生產量除各行政區人口數即可得出人均糧食生產量，計算公式(41)。

$$\text{人均糧食生產量} = \frac{(\text{稻米} + \text{普通作物} + \text{特用作物} + \text{蔬菜} + \text{果品})\text{生產量}}{\text{行政區人口數}} \quad (41)$$

#### d. 單位面積糧食生產量(Food production per unit area)

本研究中，單位面積的糧食生產量是通過將先前計算得出的糧食生產量除以耕地面積來獲得的，具體計算公式(42)。

$$\text{單位面積糧食生產量} = \frac{\text{糧食生產量}}{\text{短期耕地面積}} \quad (42)$$

#### e. 化肥負荷量(Fertilizer load)

本研究使用農業部臺中區農業改良場之臺中地區水稻施肥現況調查資料，因臺中主要稻米為蓬萊米，屬於梗稻，故參考其提供的數據，以 130.4kg/ton 和 133.8kg/ton 的平均 132.1kg/ton 為假設再與農地佔行政區面積的比例相乘，即可得出行政區內的化肥負荷量，具體計算公式(43)。

$$\text{化肥負荷量} = \frac{\text{單位農地的施肥量} \times \text{行政區農地面積}}{\text{行政區總面積}} \quad (43)$$



#### f. 農業產值比重(Proportion of agricultural output value)

本研究首先分別計算得出農業總產值公式(45)、漁業總產值公式(47)及畜牧業產值公式(48)後將其加總，再進一步計算農業產值比重公式(44)。其中農業總產值的計算包括稻米、普通作物、特用作物、蔬菜、果品各別數量乘上其預估產值後相加得出如公式(46)，漁業總產值則是根據行政區漁業從業人員與臺中市漁業從業人員的比例，乘上漁戶人口數得出，畜牧業產值則由屠宰牛、豬、羊價值總和構成，每項價值是根據屠宰數量乘以相應的價格計算得出，如公式(49)。最後，農業產值比重的計算公式為農業總產值除以農業總產值、漁業總產值和畜牧業產值的總和。

$$\text{農業產值比重} = \frac{\text{農業總產值}}{(\text{農業} + \text{漁業} + \text{畜牧業}) \text{ 總產值}} \quad (44)$$

$$\text{農業總產值} = \text{稻米} + \text{普通作物} + \text{特用作物} + \text{蔬菜} + \text{果品產值} \quad (45)$$

$$\text{各項作物的產值} = \text{預估產值} \times \text{作物數量} \quad (46)$$

$$\text{漁業總產值} = \left( \frac{\text{行政區漁業從業人員}}{\text{臺中市漁業從業人員}} \right) \times \text{漁戶人口數} \quad (47)$$

$$\text{畜牧業產值} = \text{屠宰牛價值} + \text{屠宰豬價值} + \text{屠宰羊價值} \quad (48)$$

$$\text{屠宰牛/豬/羊價值} = \text{屠宰牛/豬/羊數量} \times \text{牛/豬/羊隻價格} \quad (49)$$

#### 3.4.4 熵權法 (Entropy Weight)

熵權法是一種基於信息熵理論的客觀賦權方法，廣泛應用於多準則決策分析中，已成功應用於確定水、能源和社會經濟領域的指標權重(Duan et al., 2018, Zuo et al., 2020)。權重是根據客觀數據計算出各指標資訊有序度的差異。其核心思想在於利用信息熵衡量各指標的信息量，根據指標數據的離散程度來確定權重，離散程度越大，該指標對系統評價的貢獻越大，權重也越高；反之，權重則越低。這些數值反映了資料分散程度以及各指標對 WEF 安全的影響(Chen, 2021, Zuo et al., 2020)。相比於主觀賦權方法，熵權法能夠避免人為因素對權重設置的影響，具有科學性和客觀性的優勢。因此，在多準則決策分析中，熵權法成為一種可靠的權重確定工具。

本研究運用熵權法計算指標在子系統內的權重，以及其在整個系統中的權重。在此基礎上，進一步透過線性賦權法得到了樞紐及其三個子系統的永續性評估值。計算熵權的步驟如下：

首先，正向及負向指標的原始資料應依公式(50)及(51)進行標準化處理

$$Y_{ij}^t = \frac{X_{ij}^t - X_{i\_min}^t}{X_{i\_max}^t - X_{i\_min}^t}, X_{i\_max}^t = \max X_{ij}^t \quad (50)$$

$$Y_{ij}^t = \frac{X_{i\_max}^t - X_{ij}^t}{X_{i\_max}^t - X_{i\_min}^t}, X_{i\_min}^t = \min X_{ij}^t \quad (51)$$

式中  $Y_{ij}^t$  為標準化後的  $X_{ij}^t$ ， $i$  為水-能源-糧食指標(水、能源、糧食各六項指標)， $i$  數值為 1~18， $j$  為臺中市的行政區數量，數值為 1~29， $t$  為研究年分，因此  $t$  為 2007 年，2014 年及 2021 年。

接下來，確認指標  $i$  的熵值可以透過公式(52)、(53)求得

$$P_{ij}^t = \frac{Y_{ij}^t}{\sum_j Y_{ij}^t} \quad (52)$$

$$E_i^t = -\ln(n)^{-1} \sum_j P_{ij}^t \ln(P_{ij}^t) \quad (53)$$

式中  $P_{ij}^t$  為行政區  $j$  指標  $i$  佔  $t$  年的所有行政區指標  $i$  值總和的比例， $E_i^t$  為  $t$  年指標  $i$  的熵值， $n$  為臺中市的行政區總數，因此， $n = 29$ 。接著，根據熵值計算每個子系統中指標  $i$  的權重，計算如公式(54-56)，其中各子系統所有指標權重總和為 1。

$$\omega_i^t = \frac{1 - E_i^t}{6 - \sum_{i=1}^6 E_i^t} (i = 1, 2, \dots, 6) \quad (54)$$

$$\omega_i^t = \frac{1 - E_i^t}{6 - \sum_{i=7}^{12} E_i^t} (i = 7, 8, \dots, 12) \quad (55)$$

$$\omega_i^t = \frac{1 - E_i^t}{6 - \sum_{i=13}^{18} E_i^t} (i = 13, 14, \dots, 18) \quad (56)$$

再分別經由公式(57-59)計算出三個子系統的永續性評估值，最終經公式(60)得到鏈結永續性的綜合評估值



(57)

$$WS_j^t = \sum_{i=1}^6 \omega_i^t Y_{ij}^t$$

$$ES_j^t = \sum_{i=7}^{12} \omega_i^t Y_{ij}^t$$

(58)

$$FS_j^t = \sum_{i=13}^{18} \omega_i^t Y_{ij}^t$$

(59)

$$WEFS_j^t = \sum_{i=1}^{21} \omega_i^t Y_{ij}^t$$

(60)

式中， $WS_j^t$ 、 $ES_j^t$ 、 $FS_j^t$  分別為行政區 $j$ 在 $t$ 年的水、能源、糧食子系統永續性的評估值， $WEFS_j^t$ 為行政區 $j$ 在 $t$ 年的鏈結永續性的綜合評估值。

### 3.5 Pearson 相關係數

Pearson 相關係數(Pearson Correlation Coefficient) ，是一種統計指標，用於度量兩組數據的變量 X 和 Y 之間的線性相關的程度。它是兩個變量的共變異數與其標準差的乘積之比如公式(61)：

$$r_{xy} = \frac{cov(x, y)}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n ((x_i - \bar{x})^2)} \sqrt{\sum_{i=1}^n ((y_i - \bar{y})^2)}}$$

式中， $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 為變異數 x、y 的平均值， $x_i$ 、 $y_i$ 為變數 x、y 的第  $i$  個觀測值。

Pearson 相關係數本質上是共變異數的歸一化度量，其取值範圍介於-1 至 1 之間，數值的正負代表相關性的方向，當係數大於 0 表示正相關，意即一個變量增加時，另一個變量也以固定比例增加，兩者變化趨勢一致。相反地，x、y 的變化趨勢相同反之小於 0 表示負相關，即一個變量增加時，另一個變量以固定比例減少，若等於 0 則為無線性相關性，表示兩個變量之間沒有顯著的線性關係。在本研究中  $r_{xy} < 0$  代表之間為競合關係， $r_{xy} > 0$  為協同關係，並將顯著性分為三類組：

$|r| \geq 0.5$  表示強相關， $0.3 \leq |r| < 0.5$  表示中相關， $0.1 \leq |r| < 0.3$  表示弱相關。

### 3.6 耦合協調度

耦合協調度 (Coupling Coordination Degree, CCD) 是一種用於描述系統間交互作用及協同關係的指標，常應用於多系統或多領域綜合研究中，如社會、經濟、環境系統的互動分析。該指標用於衡量兩個或多個系統間的耦合關係是否協調，以及系統整體是否能穩定且同步發展。耦合表示多個系統之間的相互影響程度，耦合程度高，意味著系統間的聯動性強。協調強調系統間的平衡性與同步性，若某一系統過於強勢或落後，則整體協調性可能下降。耦合協調度為綜合考慮耦合程度和系統自身發展情況的結果，用於判斷系統是否處於協同發展的狀態。優勢與意義在於其能通過數學模型對系統間的互動與協同狀態進行精確的量化分析，有效地揭示多系統之間的耦合關係與發展趨勢。此外，它能進行綜合評估，為政策制定者提供多系統協同發展的全面參考，從而有助於制定更加科學合理的決策。最重要的是，它還具備問題識別的功能，能幫助定位發展過程中存在不協調的因素，從而為改進措施的制定提供方向，提升系統整體的協同發展水平。

為了評估鏈結永續性與各項生態系服務之間的協調關係，本研究採用 CCDM 計算了鏈結永續性與各項生態系服務之間的 CCD(Liao, 1999)。CCD 的方程式如(62)：

$$D_j^t = \sqrt{C_j^t \times T_j^t} \quad (62)$$

式中  $D_j^t$  呈現行政區  $j$  在  $t$  年的 CCD 計算方法，其中  $C_j^t$  和  $T_j^t$  分別由下列公式(63)、(64)計算得出

$$C_j^t = \left\{ \frac{f(X_j^t) \times g(Y_j^t)}{\left[ \frac{f(X_j^t) + g(Y_j^t)}{2} \right]^2} \right\}^{1/2} \quad (63)$$

$$T_j^t = \alpha f(X_j^t) + \beta g(Y_j^t) \quad (64)$$

其中  $C_j^t$  式中  $f(X_j^t)$  代表行政區  $j$  在  $t$  年之 WEF Nexus 永續性， $g(Y_j^t)$  代表生態系服務標準化數值， $T_j^t$  為行政區  $j$  在  $t$  年之永續性與生態系服務之整體發展等級， $\alpha$  和  $\beta$  分別 WEF Nexus 永續性與生態系服務加權因子，本研究採用等權重方案將其設為  $\alpha = \beta = 0.5$ 。

參考前人的研究，將 CCD 的類型和等級分為 6 種具體類型，如表 8 (Liao, 1999; Li et al., 2012)

表 8 CCD 的類型和分類表

CCD	型態
<b>0 ≤ D &lt; 0.2</b>	極度不協調
<b>0.2 ≤ D &lt; 0.4</b>	中度不協調
<b>0.4 ≤ D &lt; 0.5</b>	輕度不協調
<b>0.5 ≤ D &lt; 0.6</b>	輕度協調
<b>0.6 ≤ D &lt; 0.8</b>	中度協調
<b>0.8 ≤ D ≤ 1</b>	高度協調

## 第四章、研究結果



### 4.1 生態系服務量化

#### 4.1.1 年產水量

產水量不僅會受到地形、地質、氣候條件的影響，也與土地利用類型、土壤特性以及植被覆蓋有著密切相關。由圖 9 對比三年的產水量分佈與降雨量分佈，可以觀察到二者呈現高度相似的空間格局，降雨量較大的區域通常也伴隨著較高的產水量，原因可能是受地形、土壤滲透性及植被覆蓋的調節作用所影響。產水量主要集中於山區地帶，而平原地區的產水量則相對較低，這主要為山區的降雨量較充沛，且地形有利於集水與蓄水，同時植被覆蓋良好。除此之外，從歷年產水量的分佈中呈現出逐漸由和平區中間往向東西兩側遞減的空間分佈趨勢。從 2007 年、2014 年的圖對比來看，產水量在空間分佈上雖然相似，但數值上有變化，而 2021 年的降雨分佈則往西部偏移。根據模型所估計的產水量，2007 年、2014 年及 2021 年每公頃年產水量深度分別為 2422 毫米、1195.33 毫米、1576.02 毫米，如圖 11 所呈現。2007 年為三個年份中最高，主因為降雨豐沛且分佈廣泛；相較之下，2014 年和 2021 年產水量明顯下降。由於 2014 年受太平洋高壓異常強勢影響，導致夏季颱風數減少、冬季降水不足，再加上水庫淤積與管理失衡，造成嚴重缺水。2021 年則因 2020 年梅雨季短暫且雨量偏低，之後颱風未登陸，加之年初反聖嬰現象 (La Niña) 影響，全年降雨顯著減少，造成近半世紀以來最嚴重的旱災。雖然 7 月底至 8 月初受颱風與西南氣流影響出現明顯降雨，但全年產水量仍遠不及 2007 年，僅略高於 2014 年。

從圖 10 可觀察出 2007 年的產水量熱區分佈連續且密集，主要集中於山區林地，2014 年的熱區分佈則與 2007 年的分佈情形較為相似；而 2021 年熱區分佈則顯現出逐漸向西遷移的趨勢，部分高產水量的區域更加集中於靠近城市的地帶。行政區界線也顯示出各區域的產水量差異亦十分明顯，其中，位於山區的和平區產水量明顯相較於其他地區高；相較之下，市中心、工業區及沿海地區的產水量則相對較低。2007 年產水量高值區主要位於和平區，2014 年與 2007 年各行政區的產水量平均值分佈相似，但東勢區與新社區由低值區轉向高值，產水量有所改善。然而，

到了 2021 年，高值區域逐漸向都市中心的北區、東區、南區、中區及太平區等範圍移動，而和平區及東勢區的產水量平均值則有所下降。

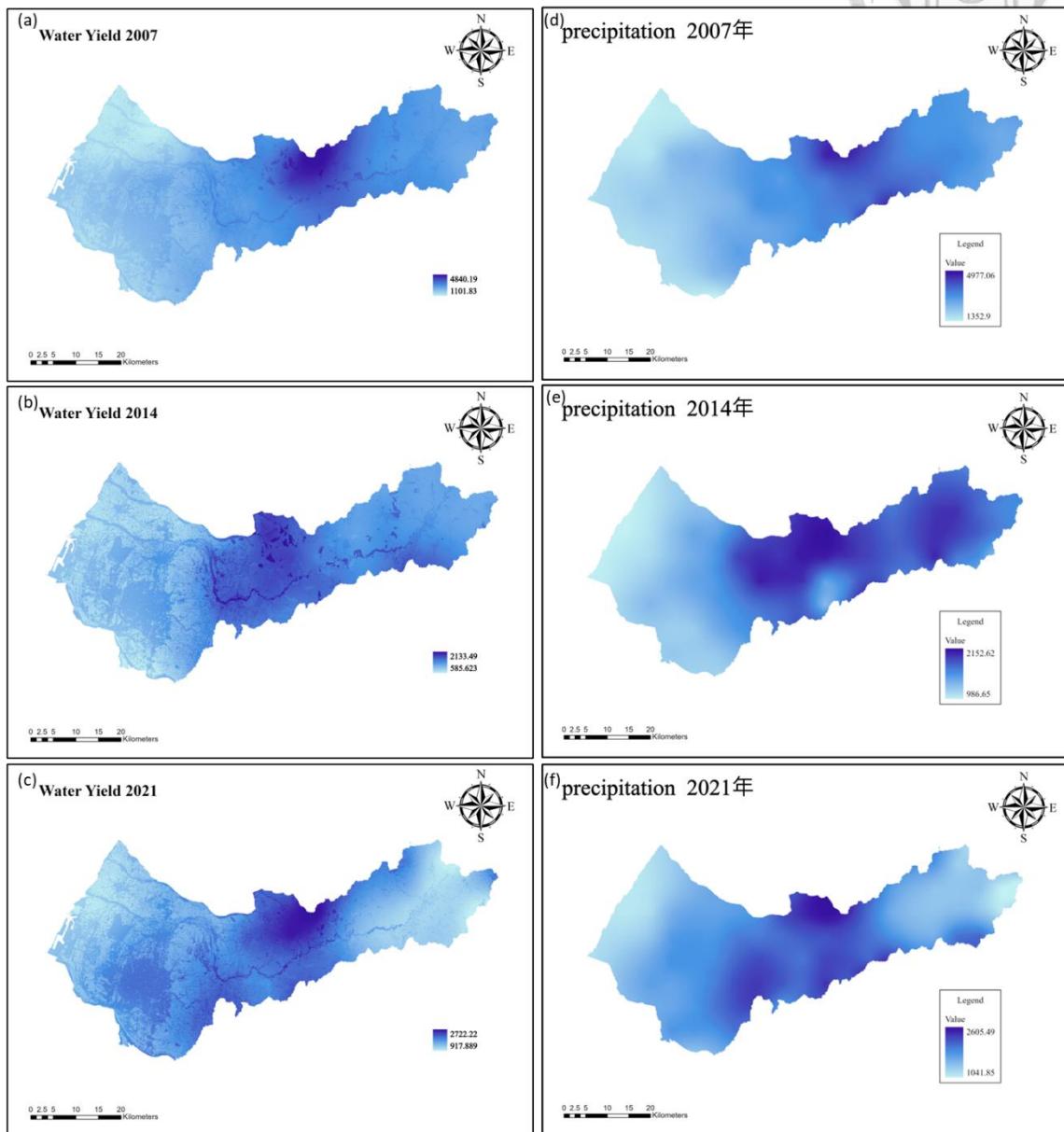


圖 9 臺中市(a)～(c)產水量分佈；(d)～(f)降水量時空分佈圖(單位:毫米)

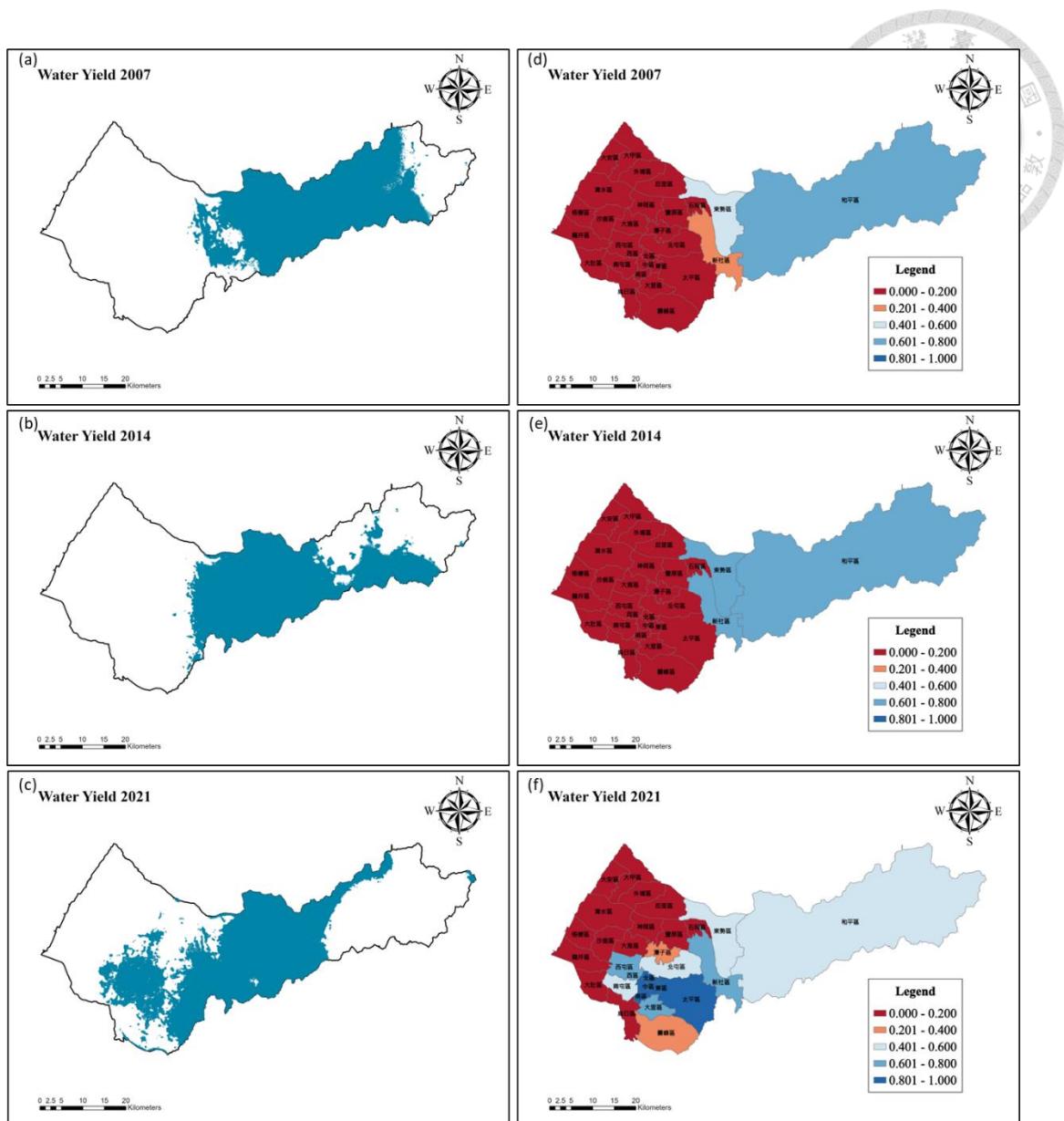


圖 10 臺中市(a)~(c)產水量熱點分佈；(d)~(f)各行政區產水量平均值

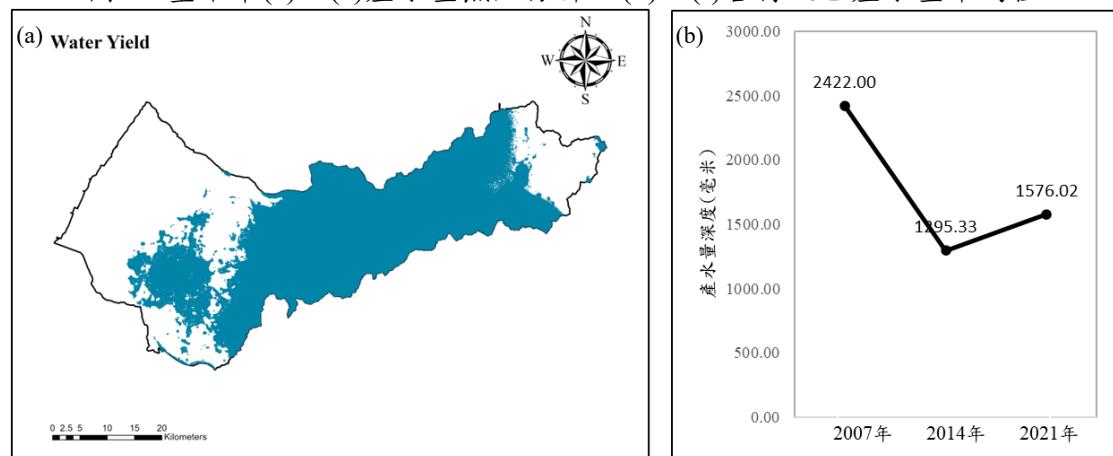


圖 11 臺中市三年合併產水量熱點分佈情形及歷年產水量變化圖



#### 4.1.2 碳儲存

根據圖 12 結果顯示，臺中市的碳儲存量在 2007 年、2014 年及 2021 年均以山區林地最高，其次分佈於林地與旱作地交錯區域。在七種土地利用類型中，林地提供最高的碳儲存量，其次為草地、旱作及稻作，而水體、建地及荒地則不具備固碳的作用。

圖 13 中三個年份之碳儲存量的熱區分佈均相似，主要集中於東部和平區、東勢區與新社區等山區及平原與山地的交界處地帶，由於山區森林覆蓋率高，因此具有較好的碳儲存能力；而西部平原區除了有農業分佈的地區有些許碳儲存功能外，其餘都市區，如臺中市中心、西屯、南屯、北屯區則因都市化導致森林與綠地縮減，且有水體、建地等其他類型的土地利用類型分佈其中，因此碳儲存能力相對較低，熱點較為稀疏零散。根據圖 14 顯示 2007 年、2014 年及 2021 年平均每公頃碳儲存量為 89.68Mg、88.88Mg、89.73Mg，整體變動幅度不大。東部山區的碳儲存量維持穩定，凸顯出森林固碳能力穩定；西部都市區以及西北部過渡地帶（如豐原、后里、外埔）則無太大變化，依舊保持少量。值得注意，2014 年平均每公頃碳儲存量略微降低，推測可能與森林用地及稻作地減少有關，而 2021 年森林用地相比 2014 年略有增加，因此導致碳儲存量亦隨之上升回到 2007 年之水準。

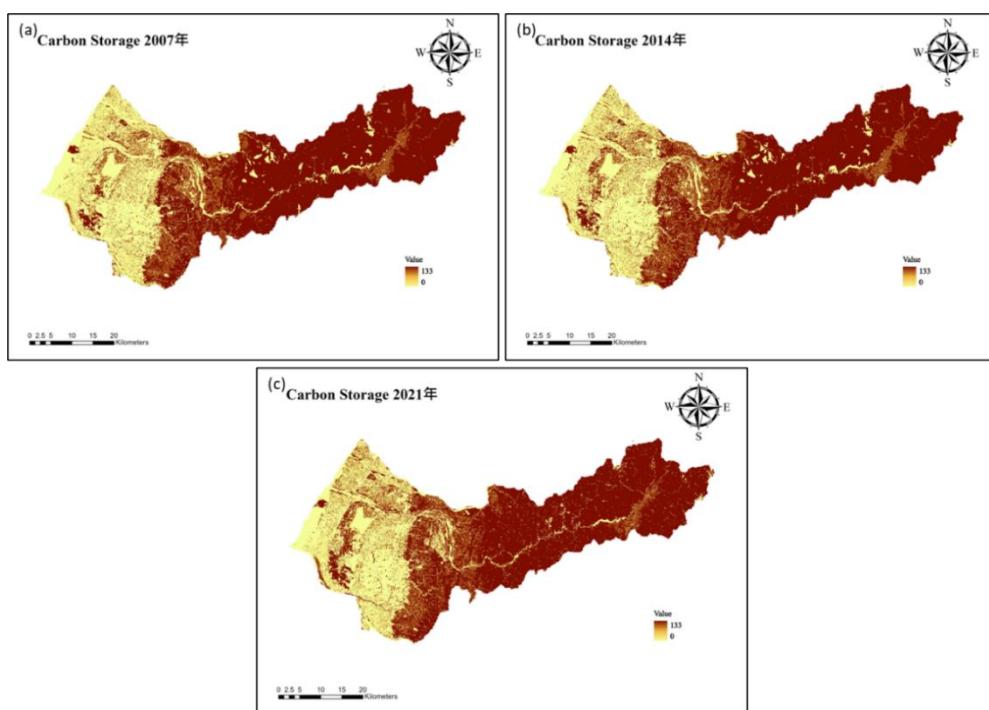


圖 12 臺中市(a)~(c)碳儲存量分佈圖(單位:Mg/ha)

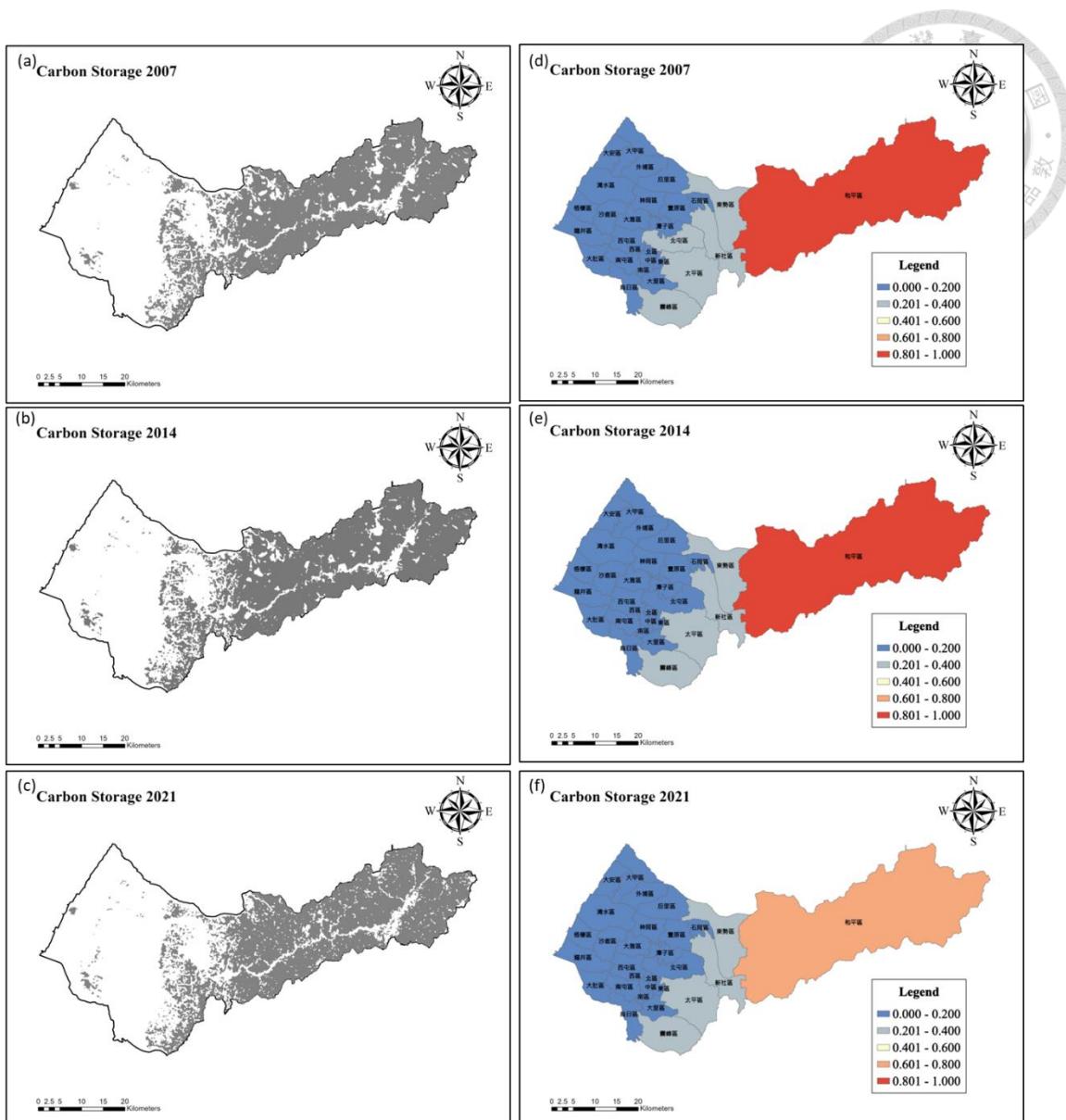


圖 13 臺中市(a)~(c)2021 年碳儲存熱點分佈；(d)~(f)各行政區碳儲存平均值

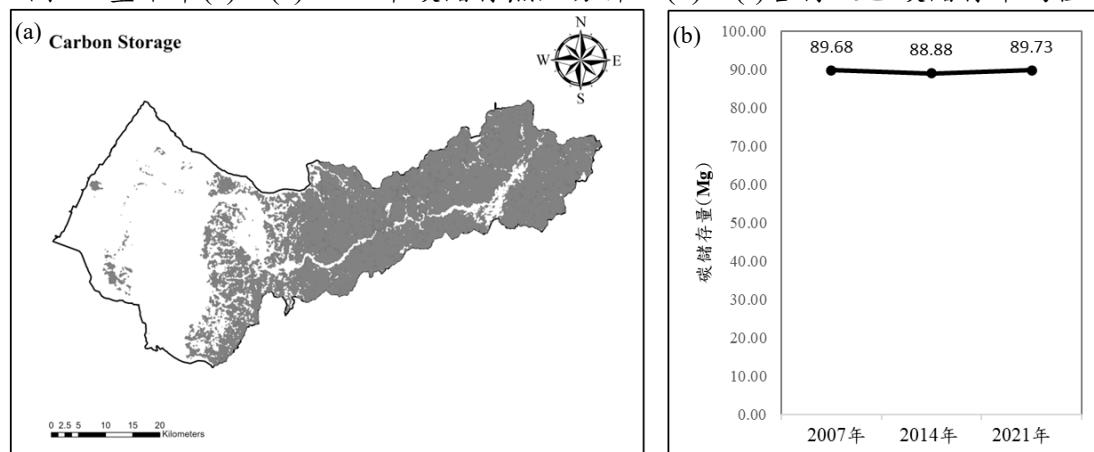


圖 14 臺中市三年合併碳儲存熱點分佈情形及歷年碳儲存量變化圖



### 4.1.3 作物生產

本研究根據 111 年臺中市各作物產量紀錄發現，水稻為產量最大宗的作物，其次為梨樹。因此，本研究選定水稻與梨樹為主要研究對象，作為作物生產指標進行模擬分析。在 InVEST 模型的模擬過程中，針對總產量進行百分位數 25、50、75 及 95 的模擬結果計算，並比較各模擬產量與該年度臺中市實際總產量的差異。根據臺中市統計通報中稻米及梨樹的實際產量概況與 InVEST Crop Production 模型中的結果相比較，發現僅 2007 年的稻米以及 2021 年的稻米和梨樹誤差在 10% 以內，其餘誤差均超過 10%，導致其結果的原因推測為模型的內部參數為 2000 年時的作物生產狀況，未能充分考量隨著農業技術進步、品種改良、耕作方式優化及環境條件變化等因素對作物產量的影響，導致模擬結果與實際產量之間存在較大偏差。為提升模擬結果的準確性，使其更符合實際生產情況。本研究採用「年比率校正法」進行作物產量模擬值的時序校準。此方法的核心理念是根據不同年度實際產量的變動趨勢，調整模擬值，使其在時間序列上能更合理反映實際變化情形。具體做法為：先確認某一年模擬值與實際值之間的誤差處於可接受範圍內（如低於 10%），再以該年作為基準，依據前後年度間的變化比率向前或向後推算其他年份的模擬值。此一方式兼顧年份間變動幅度與實際觀測資料的對應關係，有助於提升模擬結果的準確性。

其結果如表 9 所示，本研究以梨樹為例說明年比率校正法的應用。2021 年實際產量為 67,485.96 公斤，模擬產量為 72,005.37 公斤，誤差為 7%，已低於 10% 的可接受範圍，故無須進行進一步修正，並以此年作為模擬結果校正的基準年度。接續，依據 2021 至 2014 年間實際產量變化率 (-24.05%，即 2021 年相較 2014 年減少 24.05%)，以 2021 年模擬值推算 2014 年模擬產量 ( $72,005.37 \div 0.7595$ )，得到的校正模擬值與 2014 年實際產量之誤差為 6.63%。再以 2014 年模擬產量校正值為新基準，根據 2007 至 2014 年間的變化率 (-18.93%) 回推 2007 年模擬值，所得誤差為 6.59%，使其各模擬產量年份與實際產量誤差均控制在 10% 以內。通過校正方法透過實際變化趨勢導入模擬修正機制，有效提升不同年度模擬結果的準確性與一致性，進而增強資料的解釋力與應用可靠性。

表 9 稻米以及梨樹 2007 年、2014 年、2021 年實際產量與模擬產量之計算表

	年分	實際資料	模擬產量_25th	模擬產量_50th	模擬產量_75th	模擬產量_95th	校正後成果
稻米	2007年	總產量(ton)	113501.260	60160.022	77905.184	89451.573	123807.053
		誤差比例		-47.00%	-31.36%	-21.19%	9.08% 7.00%
	2014年	總產量(ton)	154768.280	55794.475	72806.635	82703.345	127042.643
		誤差比例		-63.95%	-52.96%	-46.56%	-17.91% 7.03%
梨樹	2021年	總產量(ton)	84563.460	44496.893	57628.955	66268.826	90442.969
		誤差比例		-47.38%	-31.85%	-21.63%	6.95%
	2007年	總產量(ton)	109600.980	13879.346	16025.715	31726.420	65817.774
		誤差比例		-87.34%	-85.38%	-71.05%	-39.95% 6.59%
梨樹	2014年	總產量(ton)	88854.700	13520.188	15525.295	30880.939	64114.592
		誤差比例		-84.78%	-82.53%	-65.25%	-27.84% 6.63%
	2021年	總產量(ton)	67485.960	15184.158	17740.007	34768.395	72005.367
		誤差比例		-77.50%	-73.71%	-48.48%	6.70%

根據圖 15 與圖 16 所顯示，臺中市 2007 年至 2021 年間的作物（稻米與梨樹）生產熱點分佈整體呈現穩定的空間格局。在圖(a)至(c)中，稻米（黃色）主要集中於市區西南部與中部平原地帶，而梨樹（橘色）則廣泛分佈於西北部丘陵地帶，包括外埔、后里、神岡、大雅與豐原等行政區。

三個時期中，作物生產的熱區大致呈現西北至西南的延展伸的帶狀形態。稻米生產在烏日、神岡、大雅及外埔等行政區長期維持高活躍性，該地作物生產保持穩定；梨樹熱點則聚焦於外埔、后里、豐原與石岡一帶，在三個年份中皆呈現高密度分佈。從圖(d)至(f)觀察各行政區平均值變化，后里、豐原、石岡、潭子、神岡與大雅等區在三個年份中均為中高值區。相對而言，和平、大肚、龍井與市中心等區長期落於低值範圍，顯示該區域土地利用以非農業為主及因地形限制農業發展。

三個年份作物生產量來看是呈現逐年下降，平均每公頃作物產量從 2007 年的 6.12 公噸到 2014 年的 5.21 公噸，最後減少至 2021 年的 4.15 公噸。

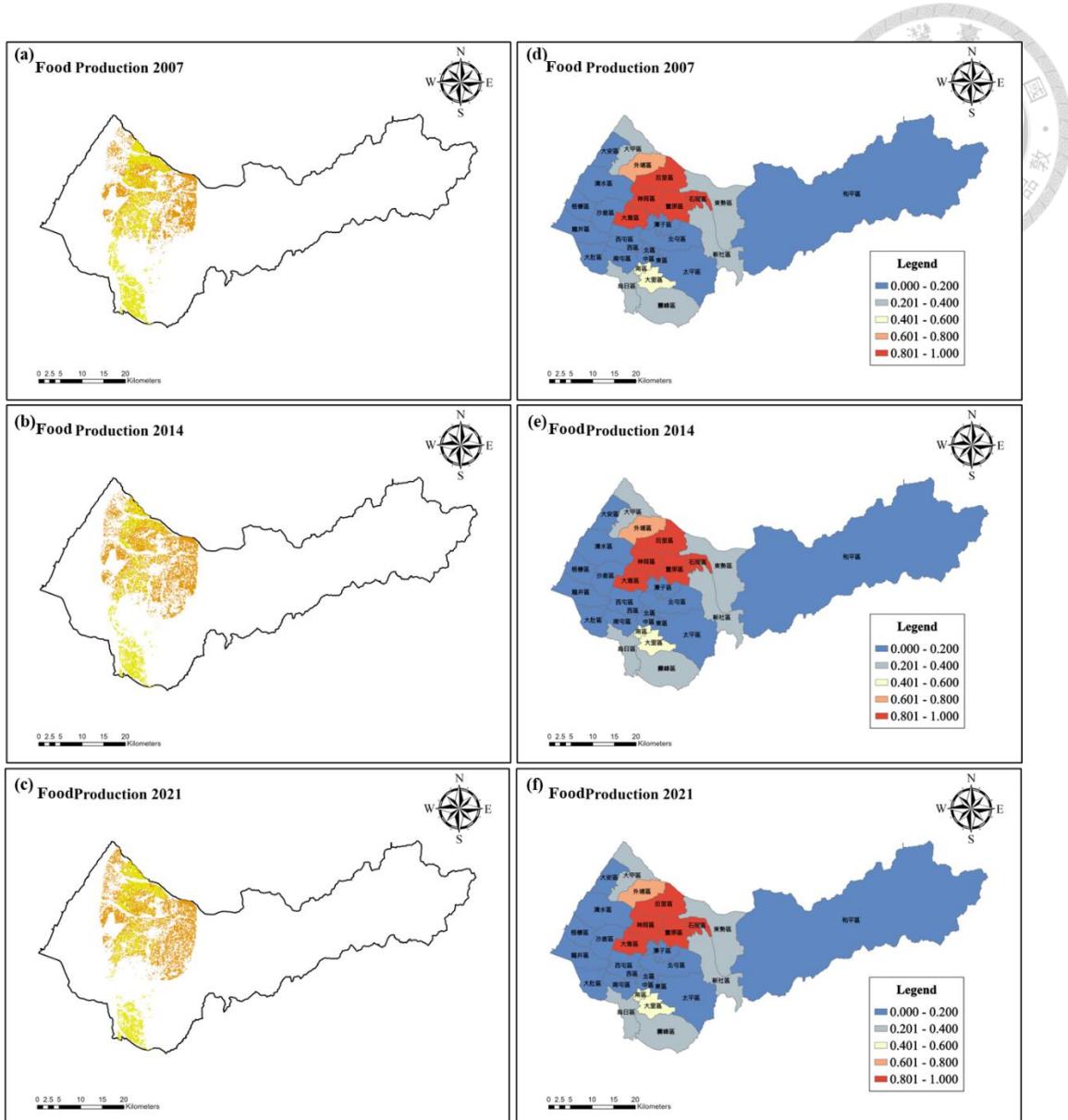


圖 15 臺中市(a)～(c) 2021 年作物(稻米+梨樹)生產熱點分佈(黃色: 稻米 ; 橘色: 梨樹) ; (d)～(f)各行政區作物平均值

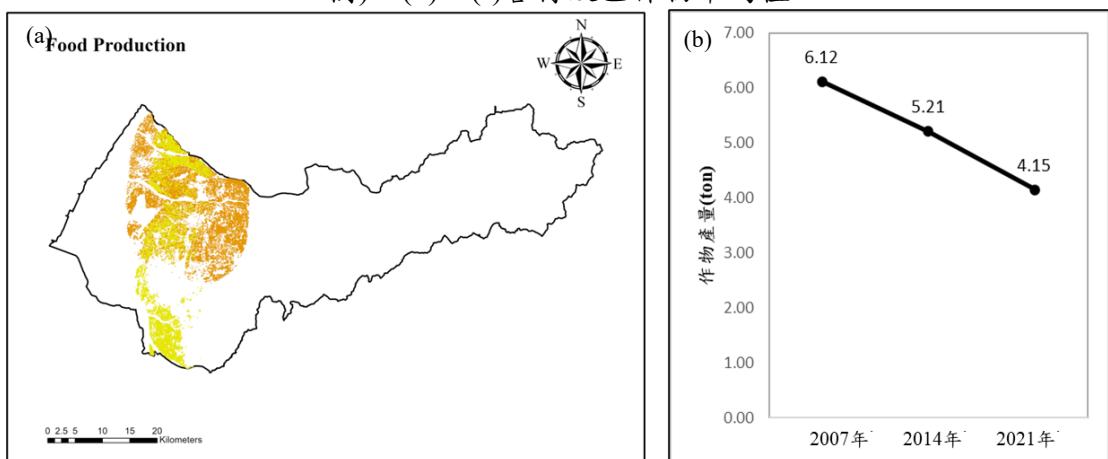


圖 16 臺中市三年合併作物生產熱點分佈情形及歷年作物生產量變化



#### 4.1.4 營養鹽留存

氮營養鹽的輸出主要受到多方面因素的影響，首先，農業活動中氮肥的施用及作物收割後的氮流失，常是氮營養鹽進入水體的主要來源。其次，城市排水系統的污水排放及雨水徑流也會攜帶大量氮進入河流和湖泊。此外，某些工業過程中產生的氮化合物作為廢物排放，也會進一步加劇了氮的流失。土壤侵蝕同樣是一個不可忽視的因素，因為隨著土壤流失，攜帶的氮也隨之流動，影響氮營養鹽的變化。在研究區域內稻作和旱作地的氮營養鹽輸出量顯著高於其他土地利用類型(圖 17)，這與其農業活動強度密切相關，而在無過多人為干擾的情況下，林地和草地則擁有良好的氮循環功能，具有較好的氮留存能力。

根據圖 17 及圖 20 顯示，2007 年、2014 年及 2021 年平均每公頃總氮營養鹽輸出量分別為 0.97 公斤、0.98 公斤、0.92 公斤。2007 年至 2014 年間氮營養鹽輸出量無太大變化，由於兩個年份的降雨主要集中於山區林地，導致山區旱作地的氮營養鹽被沖刷出土壤，導致氮營養輸出較高。在 2014 年至 2021 年間氮營養鹽輸出減少，推測與降雨量的空間分佈變化有關，降雨量往市區集中導致山區旱作地氮營養輸出減少，而西部平原區的稻作和旱作地的氮營養鹽輸出量有些微高於其他兩個年份，但 2021 年輸出量仍然下降原因推測為由於降雨量遷移導致山區旱作氮營養鹽輸出減少，而西部地區輸出量雖有所增加但由於農業用地範圍有限加上地形平坦導致氮營養鹽總體輸出量不多，因此氮營養鹽輸出相比較少。

根據圖 19 顯示，氮營養鹽的留存能力與土地利用型態息息相關，森林與草地較能固定氮營養鹽；反之，農業區則留存能力較低。在 2007 年，臺中市東部山區（和平、東勢、新社區），因森林覆蓋率高，氮營養鹽留存能力強，熱區主要集中於此；相較之下，西部農業區因人類活動影響，氮營養鹽留存量較低。2014 年，氮營養鹽留存熱區範圍與 2007 年相似，變化趨於穩定。至 2021 年，東部山區的氮營養鹽留存能力上升推測與降雨量空間分佈的改變有關，由於當年東部地區降雨減少，導致和平區等山區的營養鹽較不易被沖刷流失，進而提升其留存量。相對地，西部農業區降雨增加，使得稻作與旱作地區的氮、磷營養鹽更容易隨逕流流失，造成該區域留存熱點明顯減少。整體而言，臺中市東部山區因森林覆蓋穩定，長期維持較高的氮營養鹽留存能力；西部由於農業活動導致持續呈現低留存狀態。

磷營養鹽的輸出計算方式與氮營養鹽相似，但磷營養鹽的輸出量普遍低於氮營養鹽。研究區域內，旱作以及稻作地磷營養鹽輸出量顯著高於其他土地利用類型，這主要與農業施肥及土壤流失相關。而在無過多人為干擾的情況下，林地和草地則擁有良好磷留存能力(圖 18)。

從圖 22 總量變化來看，臺中市在 2007 年、2014 年和 2021 年的總磷營養鹽輸出量分別為 0.1135 公斤、0.1104 公斤和 0.117 公斤，呈現先上升後下降的趨勢，但整體仍維持在較低水平。總輸出量無太大變化，但由於 2021 年降雨空間上變遷原因導致山區旱作地之總磷營養鹽輸出量有逐漸減少之趨勢。

根據圖 21 臺中市磷營養鹽的空間分佈上以東部地區為主要熱區，凸顯該區域的土地利用與地形可能促使磷的累積與留存；相較之下，西部農業區（如稻作與旱作地區）則呈現較零散的熱區分佈。從三個時期的比較來看，磷營養鹽留存的空間範圍並未出現明顯的擴張或縮減。就行政區平均留存量而言，2007 年與 2014 年以和平區表現最為突出，其餘區域則分佈較為平均。至 2021 年，部分都市區域的留存量有所變化，反映出環境條件變遷及土地利用模式對磷分佈與累積的影響。特別是在 2021 年，相較於前兩年，大多數區域的磷留存量明顯下降，唯有大肚、清水、梧棲、沙鹿及南屯等區仍維持歷年的留存水準，和平區磷留存量上升，其餘行政區分佈趨勢與氮營養鹽相似。圖 22 更進一步示了磷營養鹽總輸出量於三個時期的變化：2014 年達到最高值 0.117 kg，之後於 2021 年下降至 0.1104 kg，推測這可能最主要與降雨量及分佈有關其次為土地利用變遷、農業施肥策略改變以及都市化等因素的共同影響。

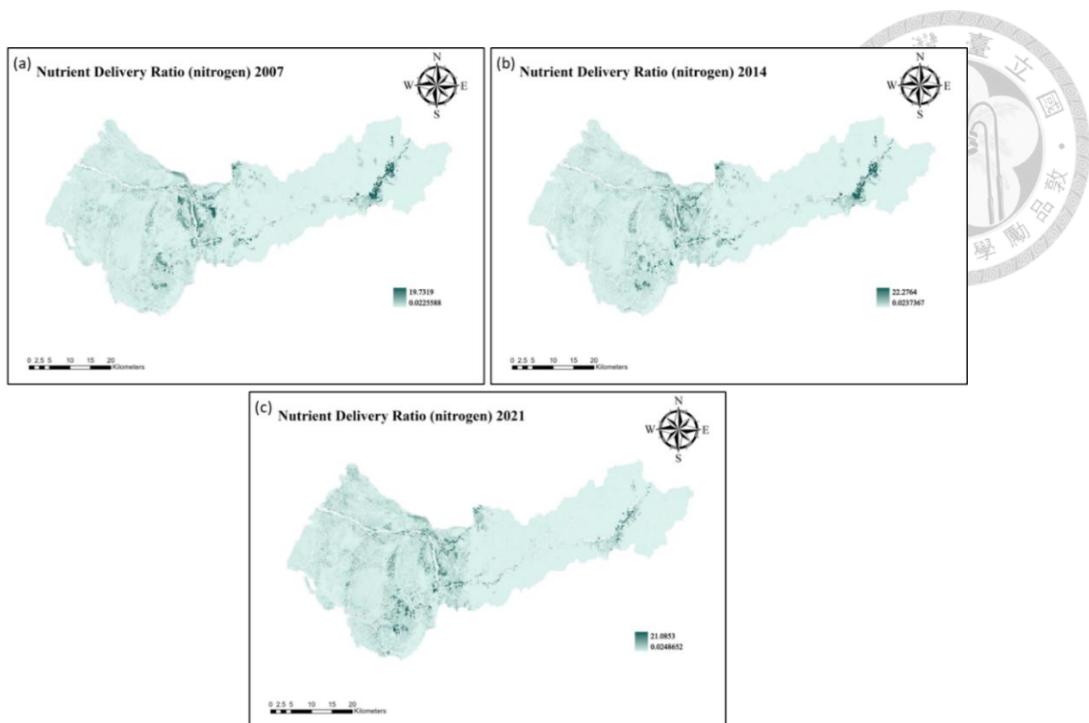


圖 17 臺中市(a)～(c)氮營養鹽輸出量分佈圖(單位:kg/ha)

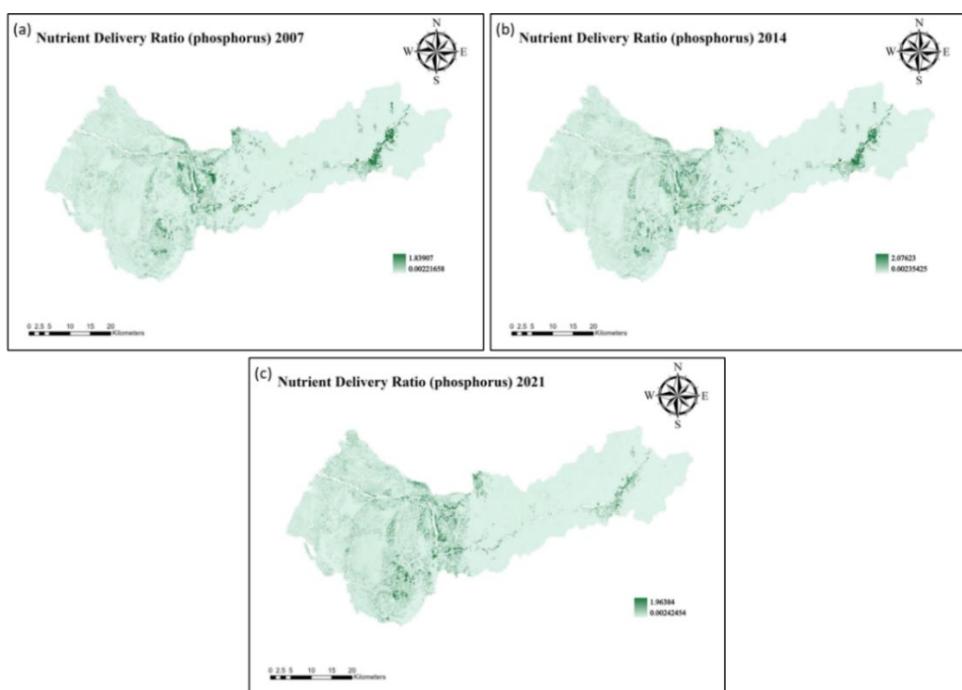


圖 18 臺中市(a)～(c)磷營養鹽輸出量分佈圖(單位:kg/ha)

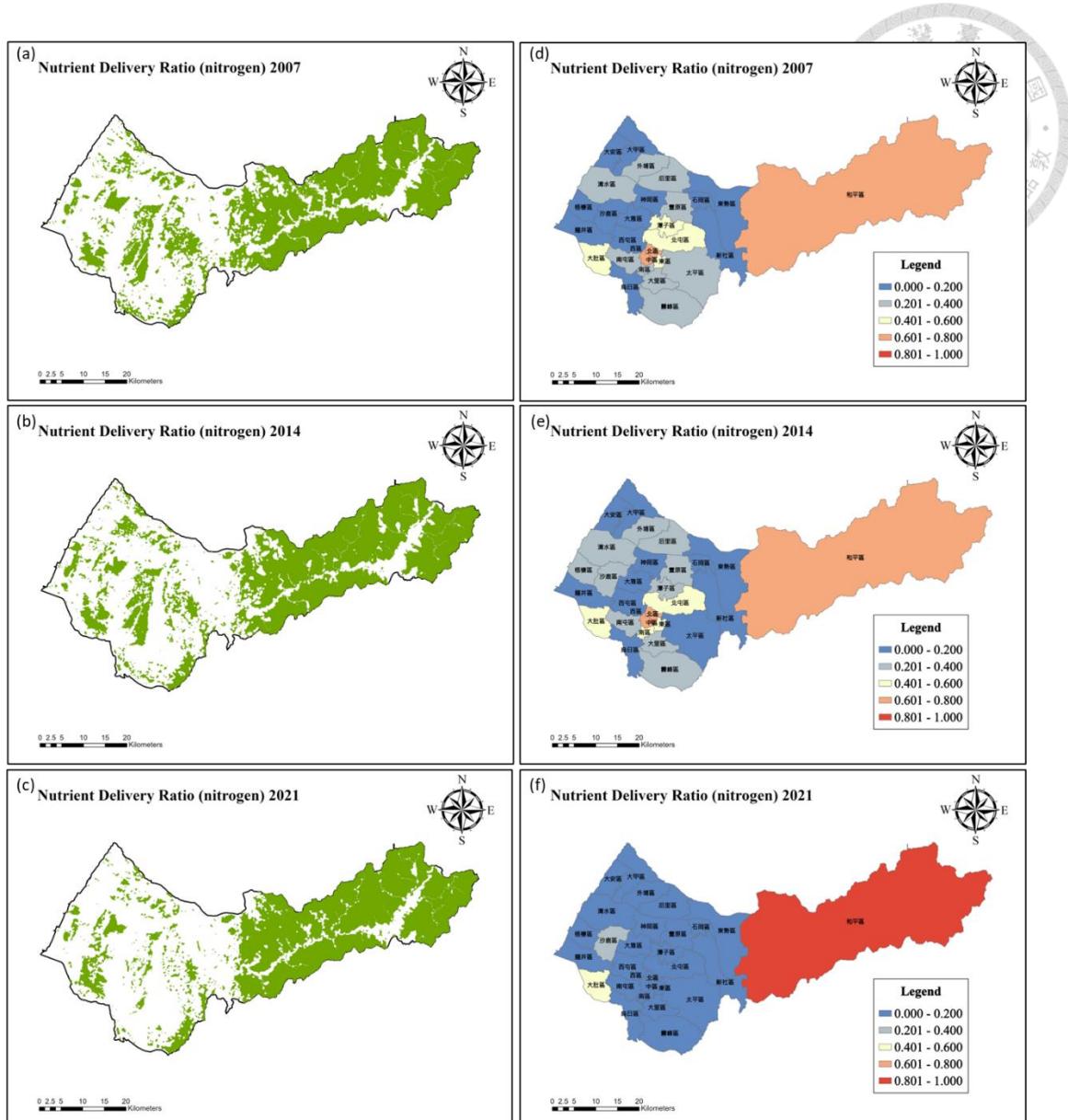


圖 19 臺中市(a)~(c)氮營養鹽留存熱點分佈；(d)~(f)各行政區營養鹽留存平均值

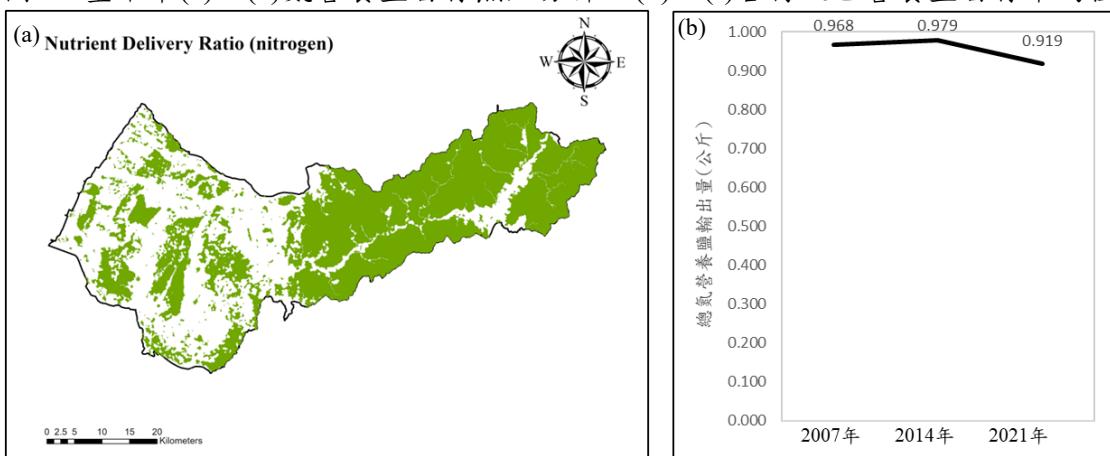


圖 20 臺中市三年合併氮營養鹽留存熱點分佈情形及歷年總氮營養鹽輸出量變化

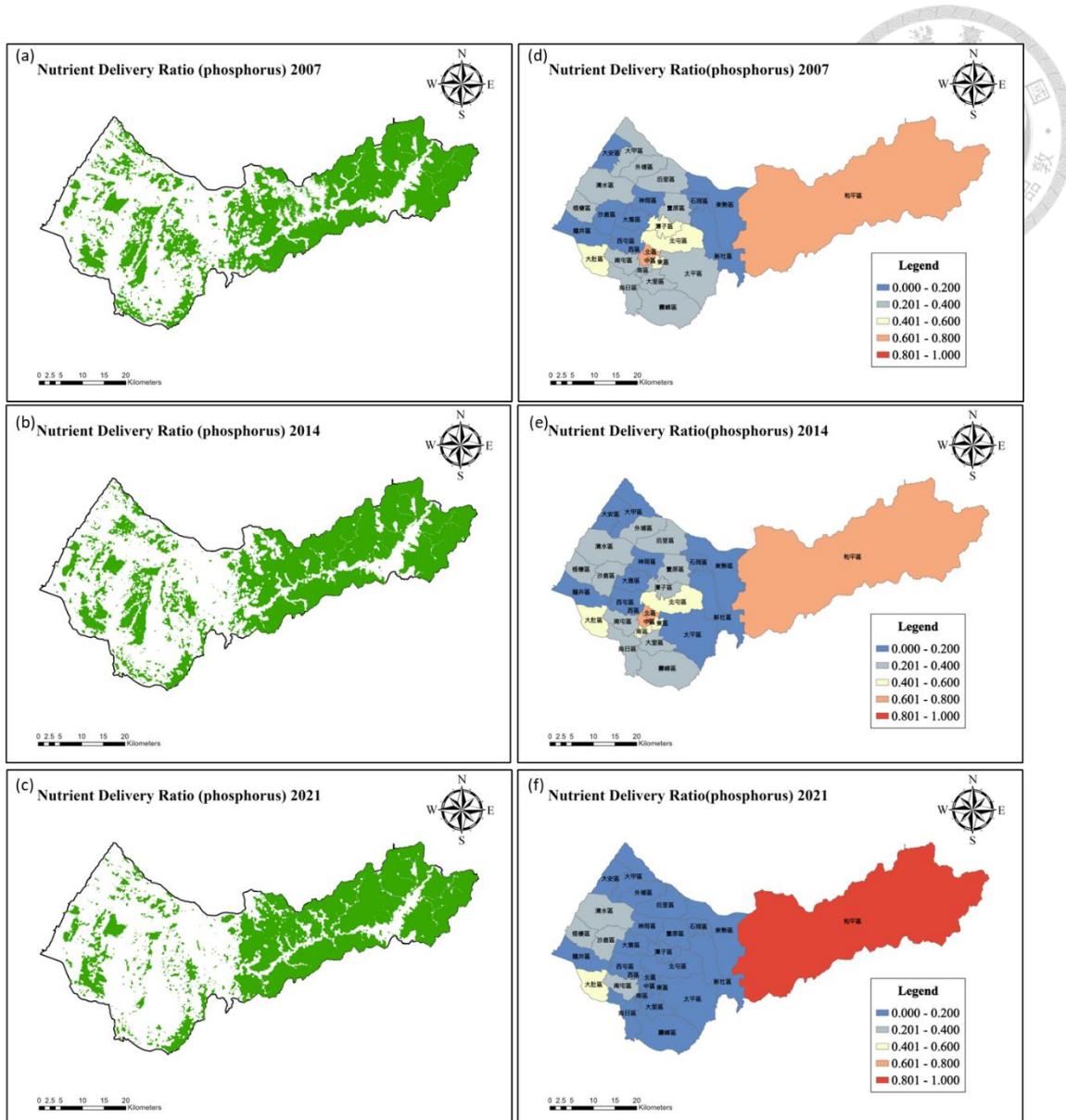


圖 21 臺中市(a)~(c)磷營養鹽留存熱點分佈；(d)~(f)各行政區磷營養鹽留存平均值

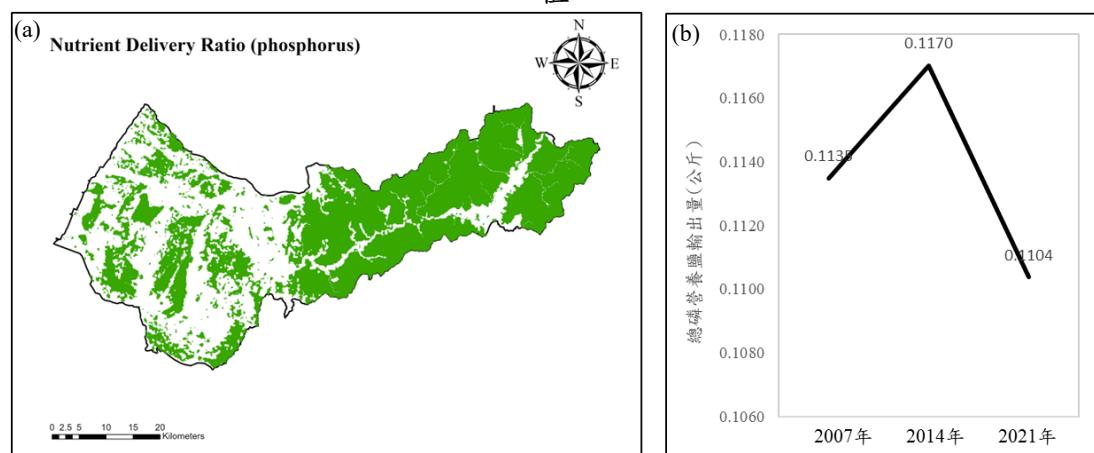


圖 22 臺中市三年合併磷營養鹽留存熱點分佈情形及歷年總磷營養鹽輸出量變化

#### 4.1.5 沉積物留存

沉積物留存指的是區域內的土壤與沉積物受植被覆蓋、地形特徵等因素影響，被攔截並固定，從而減緩土壤流失，對維持土壤健康及減少水體污染發揮關鍵作用。其中，森林與草地因為植被根系能夠鞏固土壤結構，增強土壤穩定性，有效降低侵蝕與沖刷，因此具有較強的沉積物留存能力。而地勢較為平緩的區域，由於水流速度較慢，沉積物更容易沉降並累積，因此也有助於固定土壤顆粒，減少其向下輸移。

根據圖 23、圖 24 發現沉積物留存量高的地方主要集中於山區的林地與位居平原與山地的交界處的區域。從三年間的行政區層面空間分佈來看，沉積物的留存範圍未有明顯變化，均是和平區最高，其次為東勢、新社及太平區，但局部地區的強度有所波動。圖 25 顯示，2007 年、2014 年及 2021 年，臺中市的平均每公頃沉積物留存量分別為 910.07 公噸、470.42 公噸及 465.70 公噸，2007 年至 2021 年間沉積物留存量呈現顯著下降趨勢，此變化可能受多項環境與人為因素影響，其中以降雨量減少最具關鍵性，因雨量降低造成的土壤沖蝕減少，使得整體沉積物流動量下降，進而影響沉積物的留存表現。

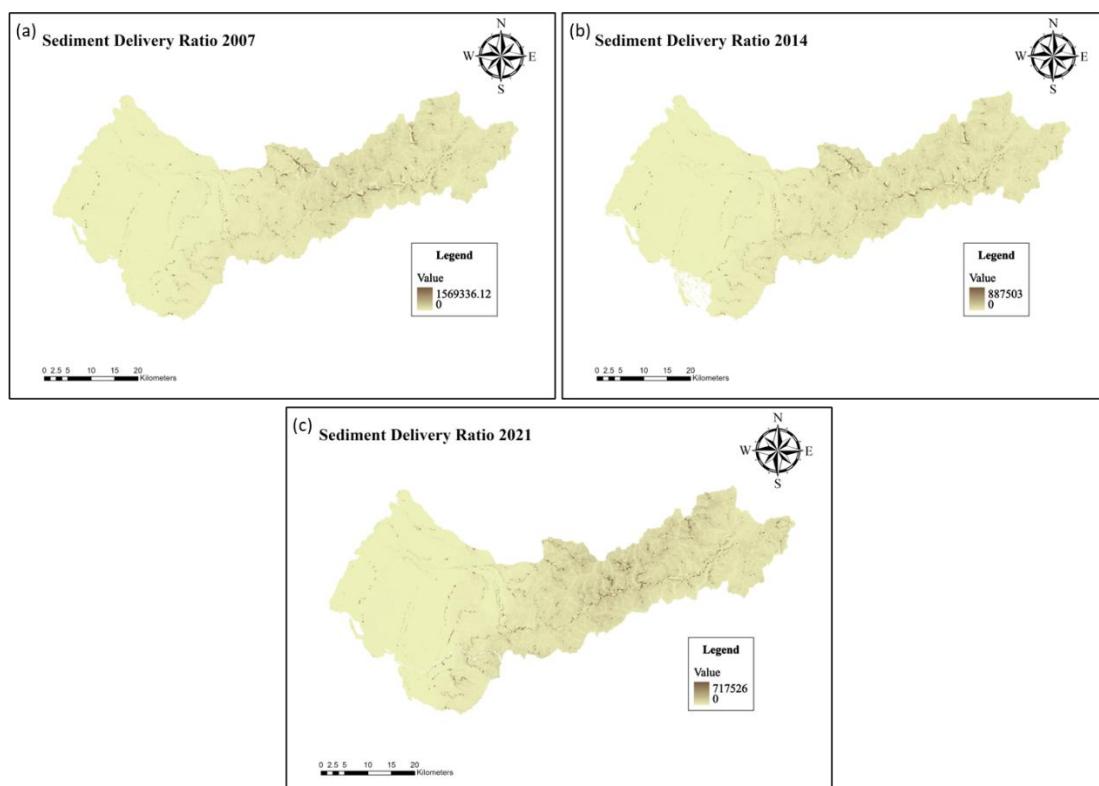


圖 23 臺中市(a)~(c)沉積物留存量分佈圖(單位:kg /ha)

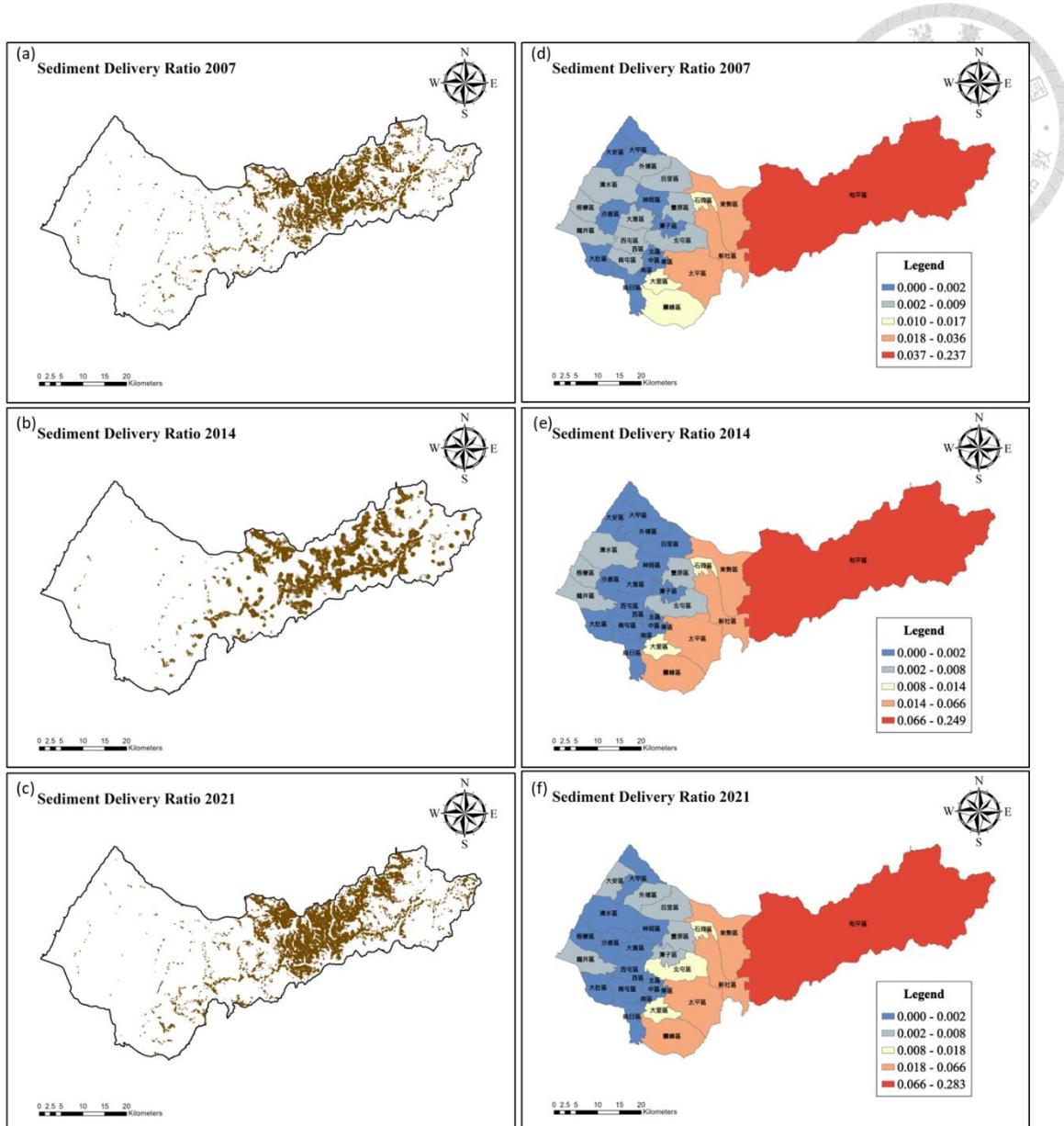


圖 24 臺中市(a)~(c)沉積物留存熱點分佈；(d)~(f)各行政區沉積物留存平均值

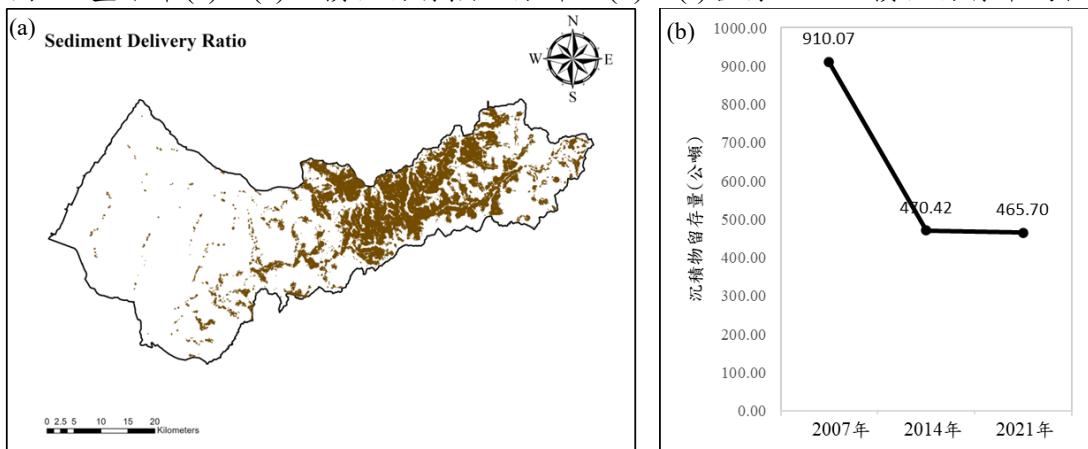


圖 25 臺中市三年合併沉積物留存熱點分佈情形及歷年沉積物留存量變化圖



#### 4.1.6 都市降溫

##### 參數驗證

本研究透過 Urban Cooling 模型來模擬臺中市都市熱島效應，並利用氣象測站實際溫度資料進行校準與驗證。由於臺中市內測站分佈於各地，部分高海拔（200公尺以上）測站可能會影響都市與鄉村溫度，因此本研究僅選取 10 處低海拔測站，包含大里、烏日、南屯、西屯、大坑、大安、清水、龍井、神岡、潭子，如圖 26。

使用 Urban Cooling 模型計算都市熱島效應時，需輸入鄉村參考溫度以及研究區域內城鄉差距最大值，根據 2014 年 10 測站 24 小時變化趨勢如圖 27，在臺中市市區與屯區範圍內之測站中，大里測站為所有測站中溫度最高之測站，及最高溫發生於 12 至 15 時之間，因此本研究選定大里測站作為都市溫度的代表測站。而同時段的大安、外埔、后里、新社屬於溫度較低之測站，其中因為外埔、后里、新社海拔較高，可能因此影響其溫度資料，為確保數據穩定性，本研究選擇海拔及溫度均較低且穩定的大安測站作為鄉村溫度代表測站。此外，為貼近都市最高溫時段，本研究將模擬時間選擇為下午兩點都市平均最高溫的時刻進行模擬，以更準確呈現都市熱島效應。圖 27 展示了 2014 年參考測站逐時溫度平均與都市熱島強度變化。

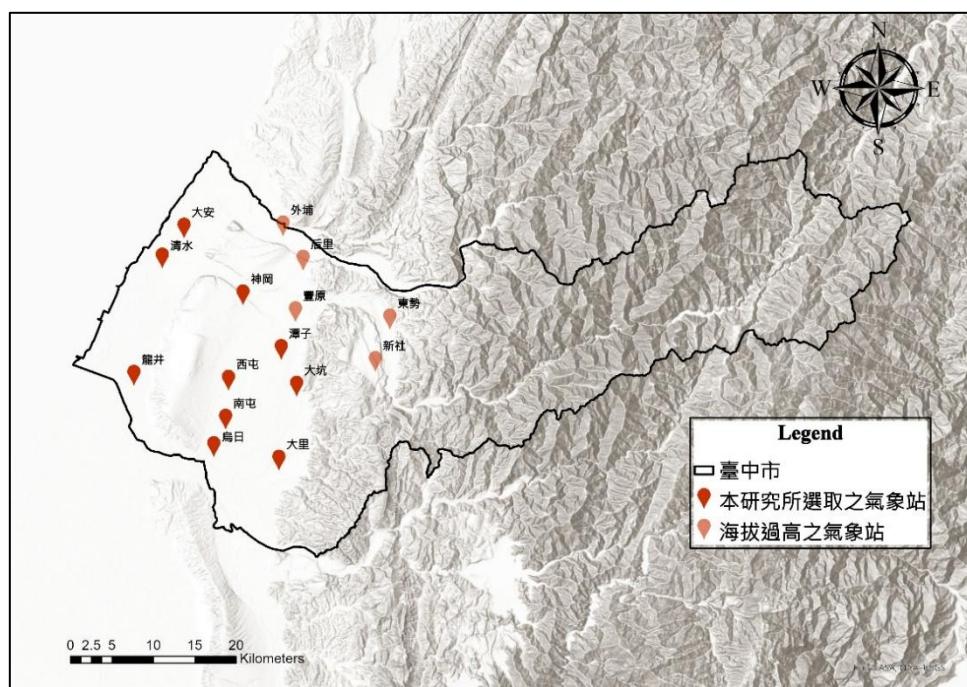


圖 26 臺中市氣象測站分佈圖

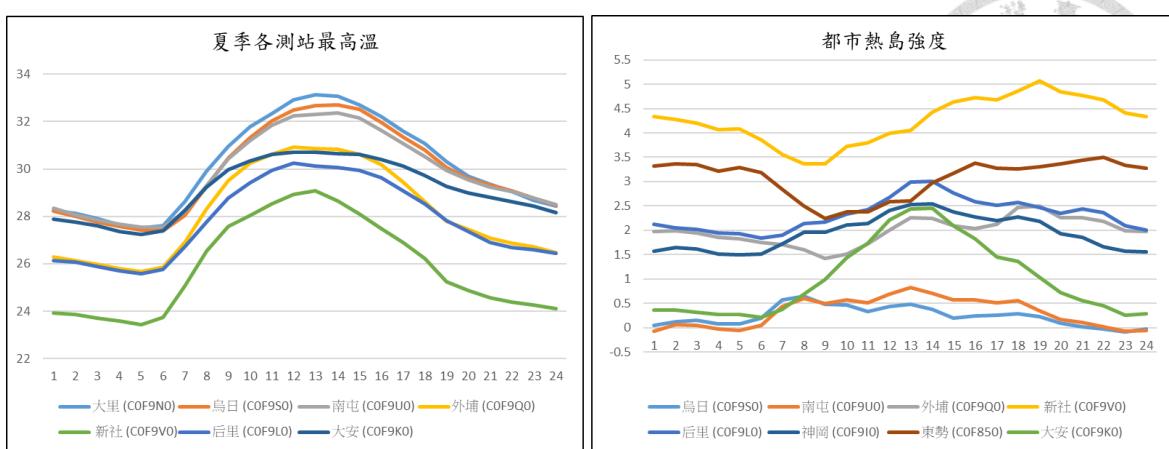


圖 27 2014 年參考測站逐時溫度平均與都市熱島強度圖

本研究在 Urban Cooling 參數設定上，透過程式模擬得到的該點位擷取之空氣溫度與氣象站所量測的溫度資料進行參數的校準，透過 1000 組隨機參數檢定，並使用 RMSE 與 MSE 來評估參數的有效性。根據 1000 組的參數檢定結果中，選出誤差最小的參數組合如下， $\omega_a = 0.201$ 、 $\omega_e = 0.148$ 、 $\omega_s = 0.676$ 、 $d_{cool} = 429.735$ 、 $r = 846.162$ ，其計組合的算結果之 RMSE 為 0.644、MSE 為 0.415。接著，透過表 10 的驗證組合進一步驗證此最佳參數設定的適用性，以確保模型結果的準確性與穩定性。由於目前僅有的土地利用資料為 2007 年、2014 年及 2021 年，因此本研究採用以下四組組合進行驗證，以確保數據的可靠性，2007 年土地利用資料搭配 2007 年氣象站資料、2014 年土地利用資料搭配 2014 年氣象站資料、2014 年土地利用搭配 2015 年夏季氣象數據（假設 2014 年至 2015 年間土地利用分佈無顯著變化）、2021 年土地利用資料搭配 2021 年氣象站資料。

表 10 InVEST Urban Cooling 驗證資料與結果

驗證組合	1	2	3	4
土地利用資料年份	2007	2014	2014	2021
測站資料年份	2007 年夏季平均溫	2014 年夏季平均溫	2015 年夏季平均溫	2021 年夏季平均溫
RMSE	0.395	0.622	0.286	0.563
MSE	0.156	0.387	0.082	0.317

## Urban Cooling 結果

InVEST 模型中的都市降溫模組可用於評估都市綠地對溫度調節的效益，其核心指標為熱緩解指數（Heat Mitigation Index, HMI）。HMI 反映各地表像元相對於區域內最熱地區的降溫能力，數值介於 0 至 1 之間，其中 0 代表幾乎無降溫效益，常見於高密度建成區等不透水面；1 則表示具有最高降溫潛力，通常為覆蓋良好的植被區域。此模型整合植被覆蓋、遮蔭潛力、蒸散速率、反照率與與高溫區的距離等因子進行模擬。HMI 可用於辨識都市中具有潛在熱緩解功能的重要綠地，作為提升熱舒適度與氣候韌性之綠色基礎設施規劃的重要依據。

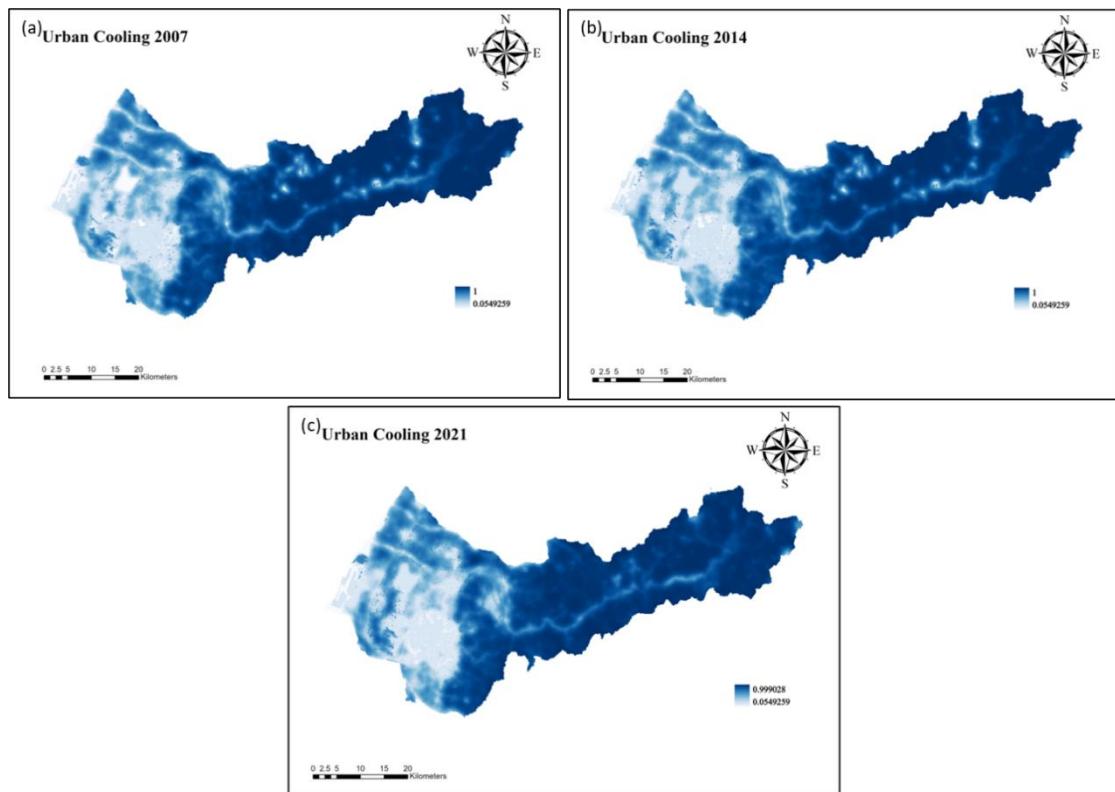


圖 28 臺中市(a)～(c)都市降溫分佈圖

根據圖 28、圖 29、圖 30 所顯示，臺中市熱調節能力主要集中於以林地為主之山區，以及林地與旱作與平原地交錯分佈的地帶，稻作與純旱作區域則次之。2007 年、2014 年、2021 年的平均每公頃熱調適指數分別為 0.7433 、0.7381 、 0.7431，，整體呈現先下降後回升的變動趨勢，惟變化幅度有限，熱調節能力於長期尺度下相對穩定。然而，2014 年熱調節表現略低，尤以新社、東勢及霧峰等區域降溫效應

範圍出現局部縮減。熱調節熱區主要分佈於東部林地，且 2007 年至 2021 年間其空間分佈相對穩定，惟 2021 年於山區之熱點密度有所增加。以行政區劃觀察，和平區熱調節效能最為顯著，東勢、新社、太平及霧峰等鄰近山區亦具較佳表現，推測與其林地覆蓋率高及人為干擾程度低有關，而市中心、沿海及工業聚落熱調節能力普遍偏弱，反映出都市核心及沿海地帶因綠地分佈稀疏與地表不透水率高，致整體熱調節能力較為不足。

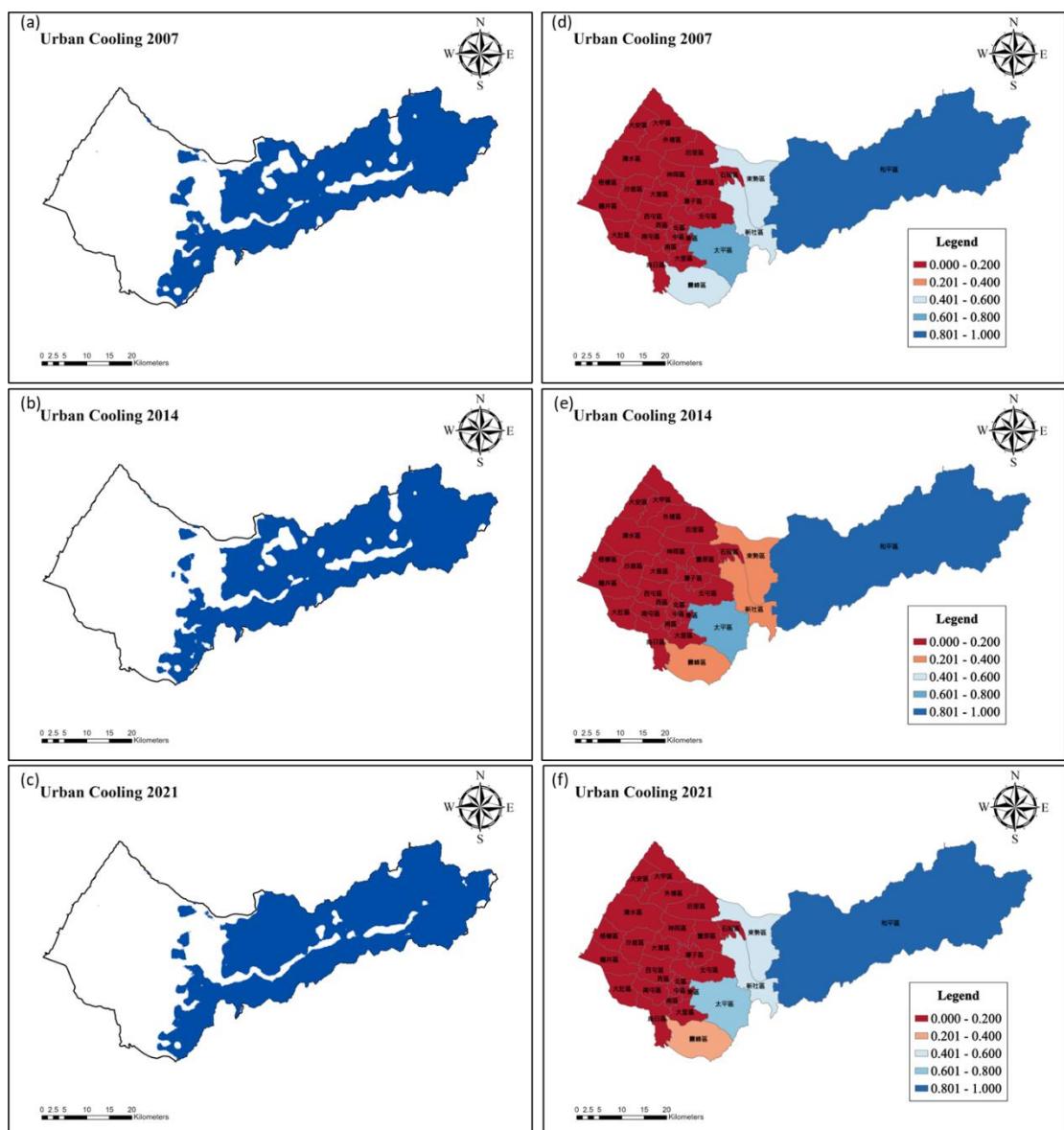


圖 29 臺中市(a)～(c)都市降溫熱點分佈；(d)～(f)各行政區都市降溫平均值

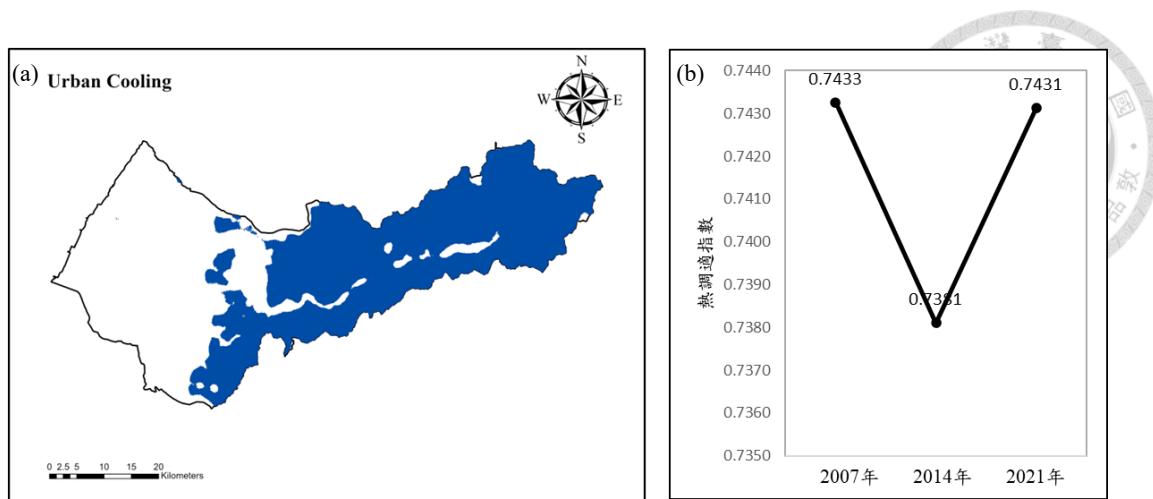


圖 30 臺中市三年合併都市降溫熱點分佈情形及歷年熱調適指數變化圖



#### 4.1.7 生態系服務熱點

本研究將同時具有四種(含)以上生態系服務熱點的區域視為生態系服務綜合熱點。完成各種生態系服務分析及找出各生態系服務熱點後，我們進一步將七種生態系服務進行疊加，得出可提供多項生態系服務熱點的區域，其生態系服務熱點疊加結果數量占比及生態系服務綜合熱點區域，如圖 31、圖 32 所示。2007 年、2014 年、2021 年具有四種(含)以上生態系服務熱點分別占整個縣市的 36.73%、36.1%、37.8%，三個年份的綜合熱點區域都主要分佈於臺中市的東部林地、草地區域，而縣市內低於三種生態系服務綜合熱點的區域主要為水體、建地、稻作地及旱作地等受人為干擾的區域。

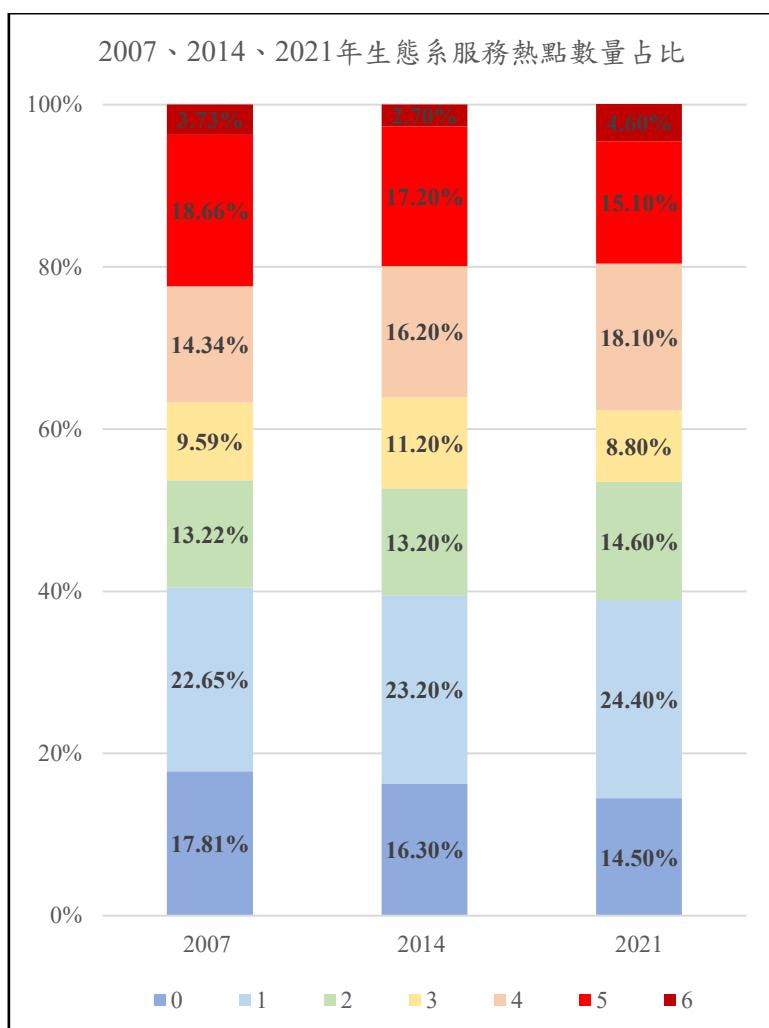


圖 31 2007 年、2014 年、2021 年生態系服務數量占比圖

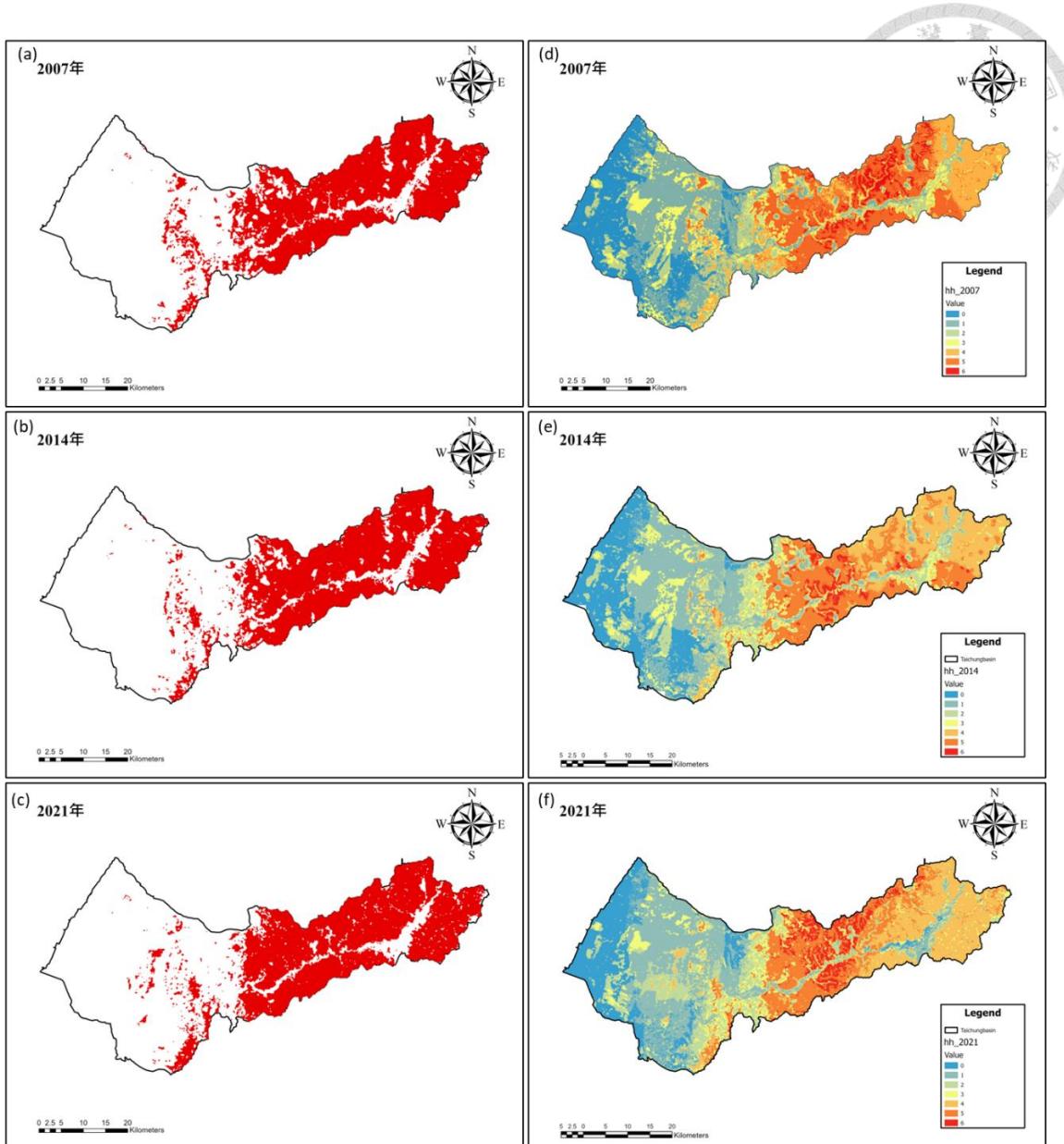


圖 32 (a)~(c)生態系服務熱點分佈圖；(d)~(f)生態系服務熱點疊加圖

圖 33、圖 34、圖 35 分別為 2007 年、2014 年、2021 年各行政區生態系服務數值圖，2007 年和平區的生態系服務數值領先於其他行政區，其次為北屯區、潭子區、豐原區，和平區的生態系服務組成以碳儲存、產水量、氮、磷營養鹽留存及都市降溫為主，北屯區、潭子區、豐原區等行政區的組成則是以作物生產及氮磷營養鹽留存為主，2014 年結果與 2007 年之組成及分佈相似，2021 年的和平區的生態系服務數值仍領先於其他行政區，其次為太平區、北屯區、新社區，和平區的生態系服務組成與 2007 及 2014 年相似，而太平區、北屯區、新社區的組成

與其他兩個年份有所差異，太平區由產水量及都市降溫成為主要，北屯區及新社區由作物生產及產水量為主要，原因為 2021 年的降雨量空間分佈逐漸往西部移。

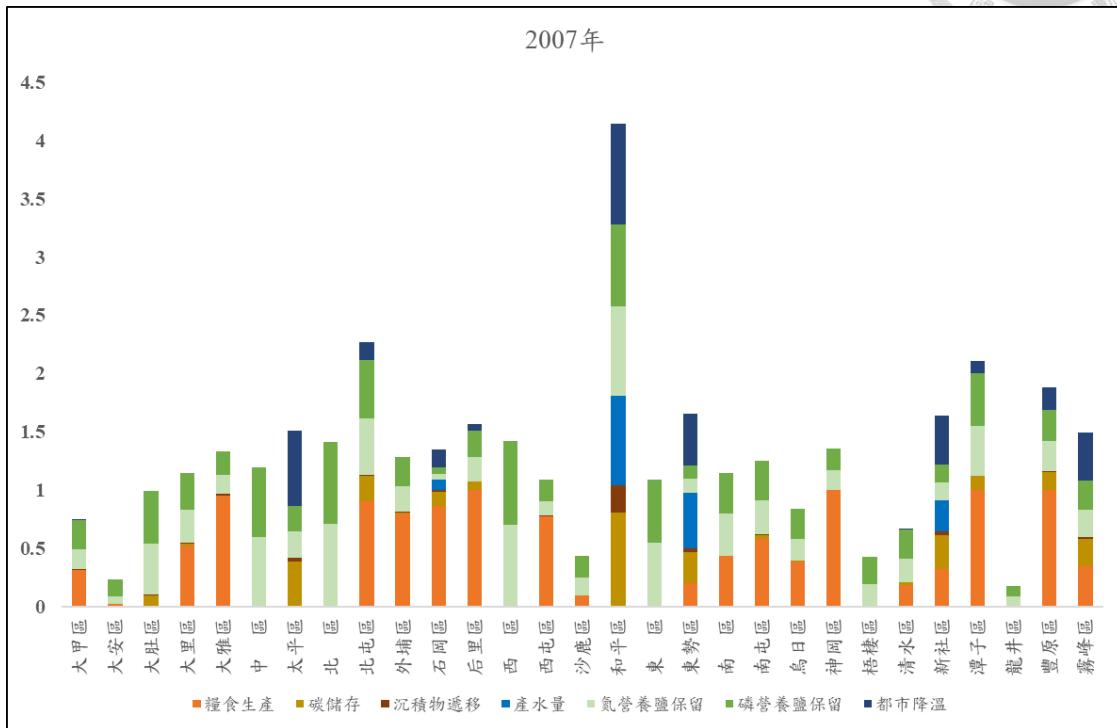


圖 33 2007 年各行政區生態系服務數值

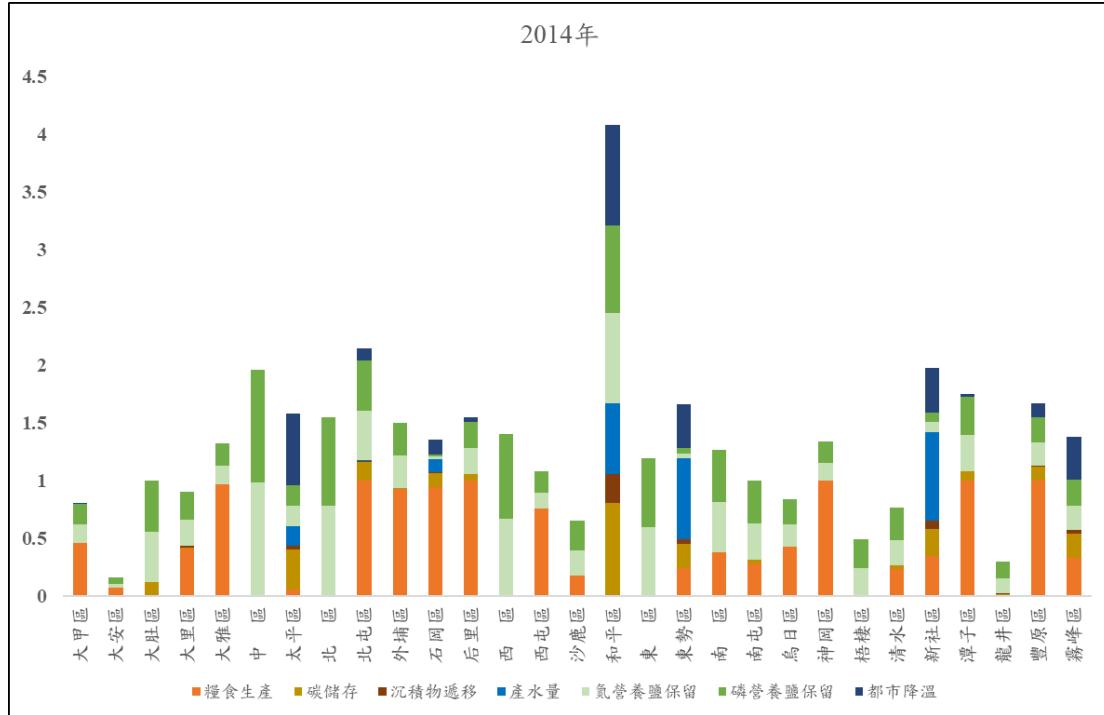


圖 34 2014 年各行政區生態系服務數值

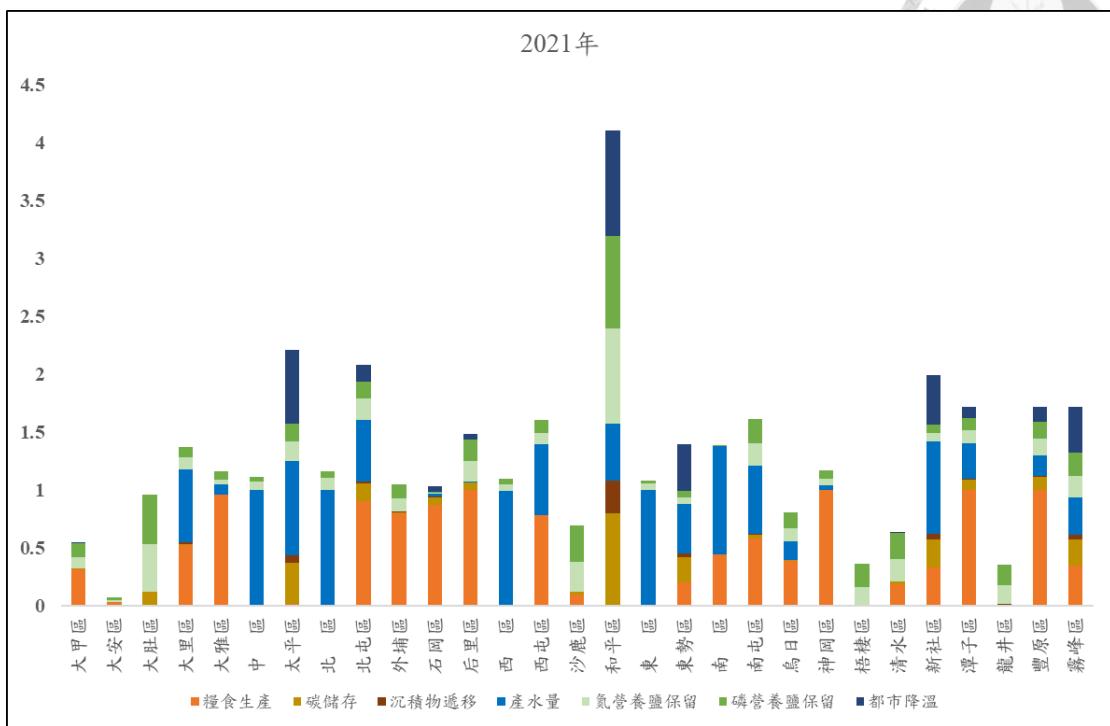


圖 35 2021 年各行政區生態系服務數值

#### 4.1.8 生態系服務權衡關係

本研究使用 Pearson 相關係數計算兩兩生態系服務之間的相關性，並應用於生態系服務權衡關係分析中。Pearson 相關係數  $r_{xy} < 0$  代表生態系服之間為競合關係， $r_{xy} > 0$  表示之間為協同關係，相關系數值越大表示相關程度越高，本研究將顯著性分為三類組如表 11： $|r| \geq 0.5$  表示強相關， $0.3 \leq |r| < 0.5$  表示中相關， $0.1 \leq |r| < 0.3$  表示弱相關來進行後續的權衡分析討論。統計檢定方面，係依據  $p$  值( $p$ -value) 作為顯著性判定的依據。一般而言，當  $p$  值小於 0.05 時，即認定變數間具統計上顯著相關 (significant)，代表可拒絕虛無假設；若  $p$  值進一步低於 0.01 或 0.001，則分別界定為高度顯著 (highly significant) 或極高度顯著(extremely significant)，反映變數間具較強的交互關係。為提升分析結果之可讀性與判讀效率，研究表格中採用星號標註顯著性水準，分別以 \* 表示  $p < 0.05$ ，\*\* 表示  $p < 0.01$ ，\*\*\* 表示  $p < 0.001$ 。

表 11 權衡關係的相關程度分類表

	協同關係	競合關係
弱相關	$0.1 \leq r < 0.3$	$-0.3 \leq r < -0.1$
中相關	$0.3 \leq r < 0.5$	$-0.5 \leq r < -0.3$
高相關	$r \geq 0.5$	$-0.5 \geq r$

臺中市 2007 年、2014 年、2021 年之生態系服務間的 Pearson 相關係數如表 12 至表 14。結果顯示，2007 年、2014 年與 2021 年分別各出現六對、七對以及八對競合關係，且競合關係的生態系服務幾乎均與作物生產以及產水量有關。

在 2007 年，除作物生產與其他所有生態系服務皆呈現競合關係，以及磷營養鹽留存與都市降溫間無明顯相關外，其餘生態系服務多呈現不同程度的協同關係。其中，相關性最高的是氮營養鹽留存與磷營養鹽留存 ( $r = 0.991$ )，其次為碳儲存與都市降溫 ( $r = 0.958$ )。到了 2014 年，作物生產仍與其他生態系服務維持競合關係，而產水量與氮營養鹽留存、氮營養鹽留存與都市降溫、以及磷營養鹽留存與都市降溫則呈現無相關性，其餘生態系服務間則維持穩定的協同關係。當年相關性最高者為氮營養鹽留存與磷營養鹽留存 ( $r = 0.996$ )，其次為碳儲存與都市降溫 ( $r = 0.949$ )，以及碳儲存與沉積物留存 ( $r = 0.930$ )。至 2021 年，除了作物生產與產水量外，碳儲存、沉積物留存、氮與磷營養鹽留存間皆維持穩定且高度的協同關係，顯示該年生態系統的整體調節功能已有所提升。其中，氮營養鹽留存與磷營養鹽留存的相關性最高 ( $r = 0.988$ )，其次為碳儲存與都市降溫 ( $r = 0.958$ )，及碳儲存與沉積物留存 ( $r = 0.944$ )。

此外，各年度氮與磷營養鹽留存的空間熱點分佈受到地形與土地利用的影響，呈現趨勢一致，因而維持高度的相關性。2007 年氮營養鹽留存與沉積物留存呈高度協同，碳儲存、產水量、都市降溫則與氮、磷營養鹽留存間僅為弱協同關係。2014 年，作物生產與氮、磷營養鹽留存由弱競合轉為高度競合，其他多數協同關係則維持穩定，僅產水量與都市降溫分別與氮營養鹽留存關係轉為無相關，產水量與磷營養鹽留存轉為弱競合。到了 2021 年，作物生產與氮、磷營養鹽留存的競合程度降低為弱競合，而碳儲存與氮、磷營養鹽留存、沉積物留存與氮營養鹽留存則升為高度協同關係。產水量因受降雨總量與其空間分布影響，與其他生態系服務間的關係

亦呈現變化。

表 12 2007 年生態系服務之間的 Pearson 相關係數

Pearson's Correlations							
Variable	Crop production	Carbon storage	SDR	NDR_n	NDR_p	Urban Cooling	Water Yield
Crop production	—						
Carbon storage	-0.117	—					
SDR	-0.186	0.876***	—				
NDR_n	-0.293*	0.274*	0.354**	—			
NDR_p	-0.293*	0.197	0.291*	0.991***	—		
Urban Cooling	-0.161	0.958***	0.773***	0.143	0.060	—	
Water Yield	-0.200	0.821***	0.872***	0.221	0.148	0.762***	—

\* p < .05, \*\* p < .01, \*\*\* p < .001

表 13 2014 年生態系服務之間的 Pearson 相關係數

Pearson's Correlations							
Variable	Crop production	Carbon storage	SDR	NDR_n	NDR_p	Urban Cooling	Water Yield
Crop production	—						
Carbon storage	-0.160	—					
SDR	-0.229	0.93***	—				
NDR_n	-0.378*	0.168	0.244	—			
NDR_p	-0.374*	0.13	0.212	0.996***	—		
Urban Cooling	-0.213	0.949***	0.851***	0.051	0.01	—	
Water Yield	-0.194	0.686***	0.701***	-0.077	-0.117	0.745***	—

\* p < .05, \*\* p < .01, \*\*\* p < .001

表 14 2021 年生態系服務之間的 Pearson 相關係數

Pearson's Correlations							
Variable	Crop production	Carbon storage	SDR	NDR_n	NDR_p	Urban Cooling	Water Yield
Crop production	—						
Carbon storage	-0.179	—					
SDR	-0.224	0.944***	—				
NDR_n	-0.263	0.766***	0.793***	—			
NDR_p	-0.246	0.718***	0.751***	0.988***	—		
Urban Cooling	-0.204	0.958***	0.87***	0.588***	0.54**	—	
Water Yield	-0.288	0.131	0.127	-0.117	-0.23	0.211	—

\* p < .05, \*\* p < .01, \*\*\* p < .001



## 4.2 WEF 永續性指標評估

### 4.2.1 水子系統

水子系統永續性指標的計算涉及人均水資源、人均用水量、單位 GDP 用水量、工業額外產值用水量、水資源利用率及廢(污)水量等因素。根據圖 36 及圖 37 顯示，2007 年至 2021 年間，臺中市的水資源系統永續性指標呈現東高西低的趨勢，尤以和平區的永續性遠高於其他行政區。整體而言，東部因主要降雨量充沛，森林覆蓋率高且人口及工業密度低，因此山區的水資源狀況較為穩定；反之，西部與中部因降雨分佈不均、都市化快速發展、人口密度較高及農業用水需求較大，導致水資源壓力較高，指標相對較低。三個年份水子系統永續性指標整體的趨勢穩定，高值與低值範圍變化不大，臺中市除了和平區以外之行政區水資源壓力仍持續存在。

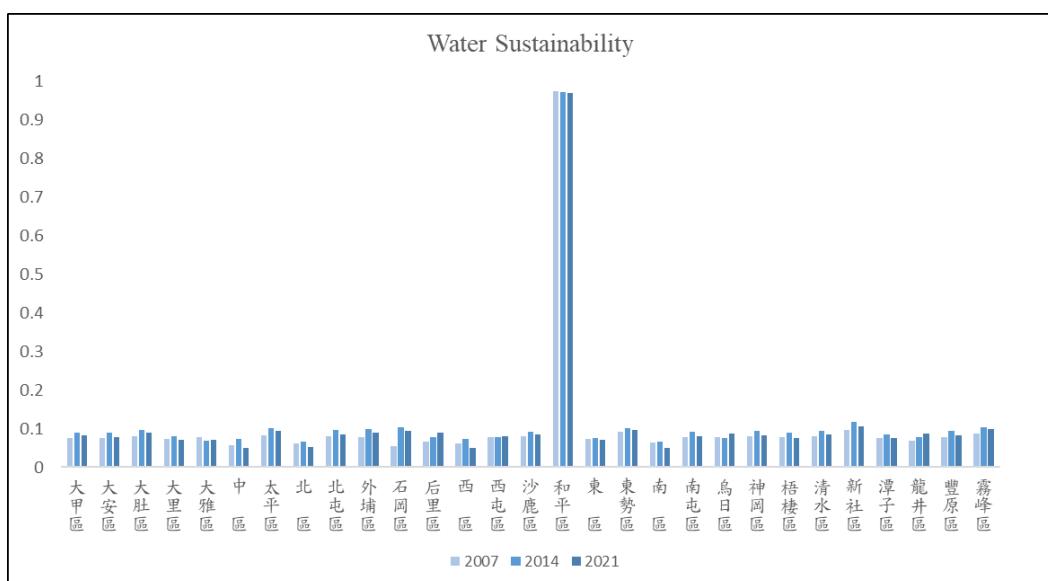


圖 36 臺中市各行政區 2007 年、2014 年、2021 年水子系統永續性

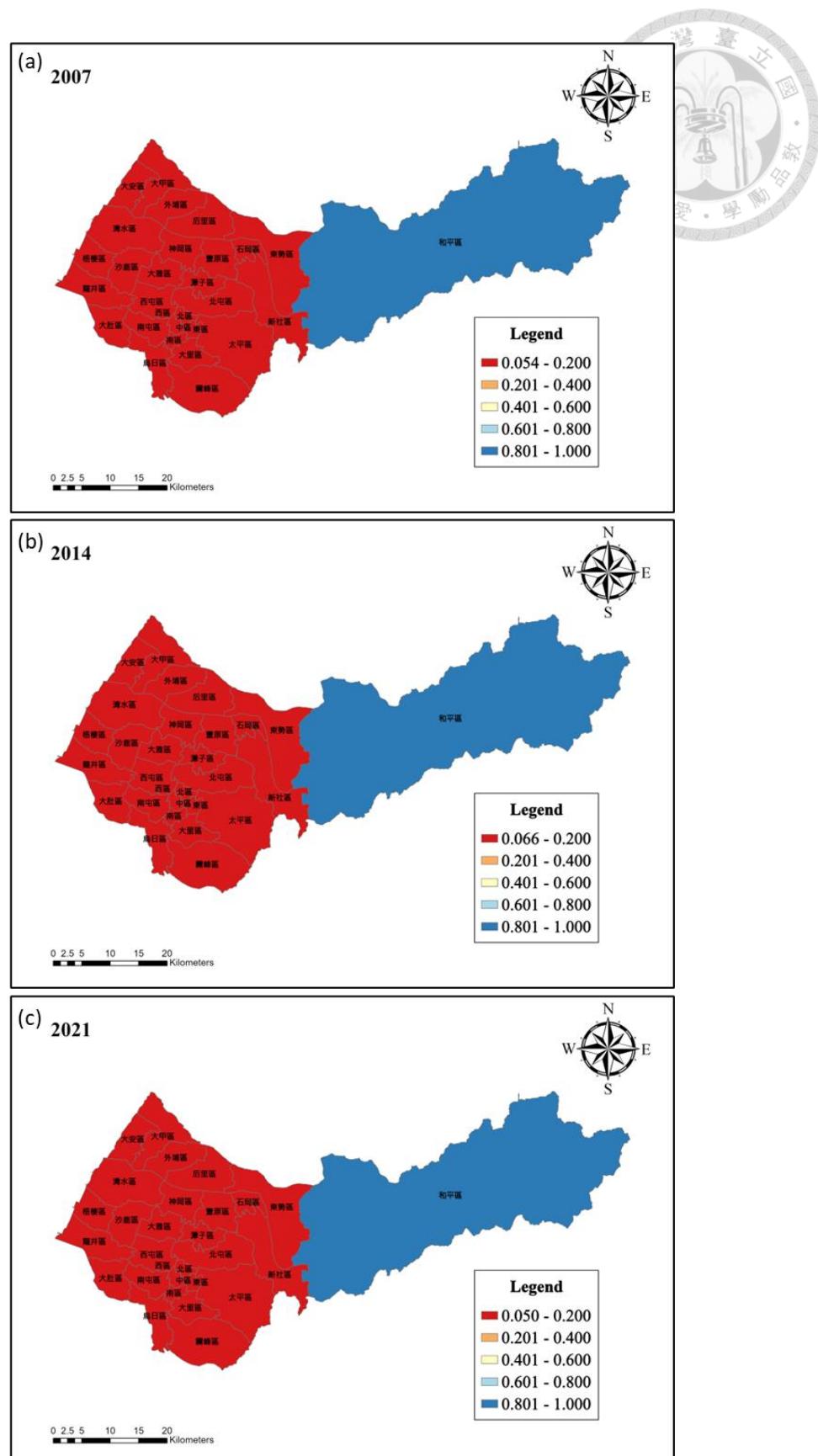


圖 37 臺中市水子系統永續性指標分佈



#### 4.2.2 能源子系統

能源子系統永續性指標之計算涵蓋多項構面，包含人均能源消耗、能源密集度、碳強度、工業固體廢棄物處理狀況、電氣化比例以及科技投資佔 GDP 比重等要素。根據圖 39 與圖 40 資料顯示，臺中市在 2007、2014 與 2021 年間，能源子系統永續性呈現出明顯之時間與空間差異。

2007 年整體永續表現偏低，僅大雅、后里、西屯及潭子等以工業發展為主之行政區永續相對高於其他行政區；反觀東部地區如和平、新社與東勢等，普遍落入低永續性範疇。至 2014 年，整體永續性未見明顯突破，但大雅區仍維持高指標水準，西屯、后里與西區等地亦延續 2007 年的穩定表現；另有大肚、烏日與太平等區之永續性略有提升。2021 年部分行政區永續性出現退步，整體指標趨於平緩甚至略有下滑。惟大雅、后里、西屯及西區等地仍保持中等偏高水準，呈現一定程度的穩定性，東部區域則是皆未顯示顯著改善，長期處於低永續性狀態。

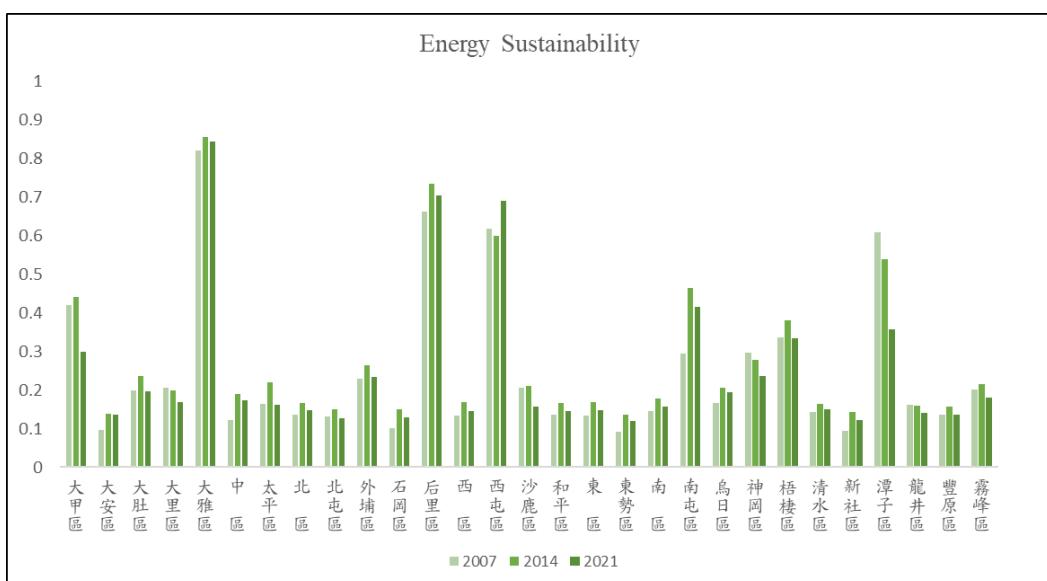


圖 38 臺中市各行政區 2007 年、2014 年、2021 年 能源子系統永續性

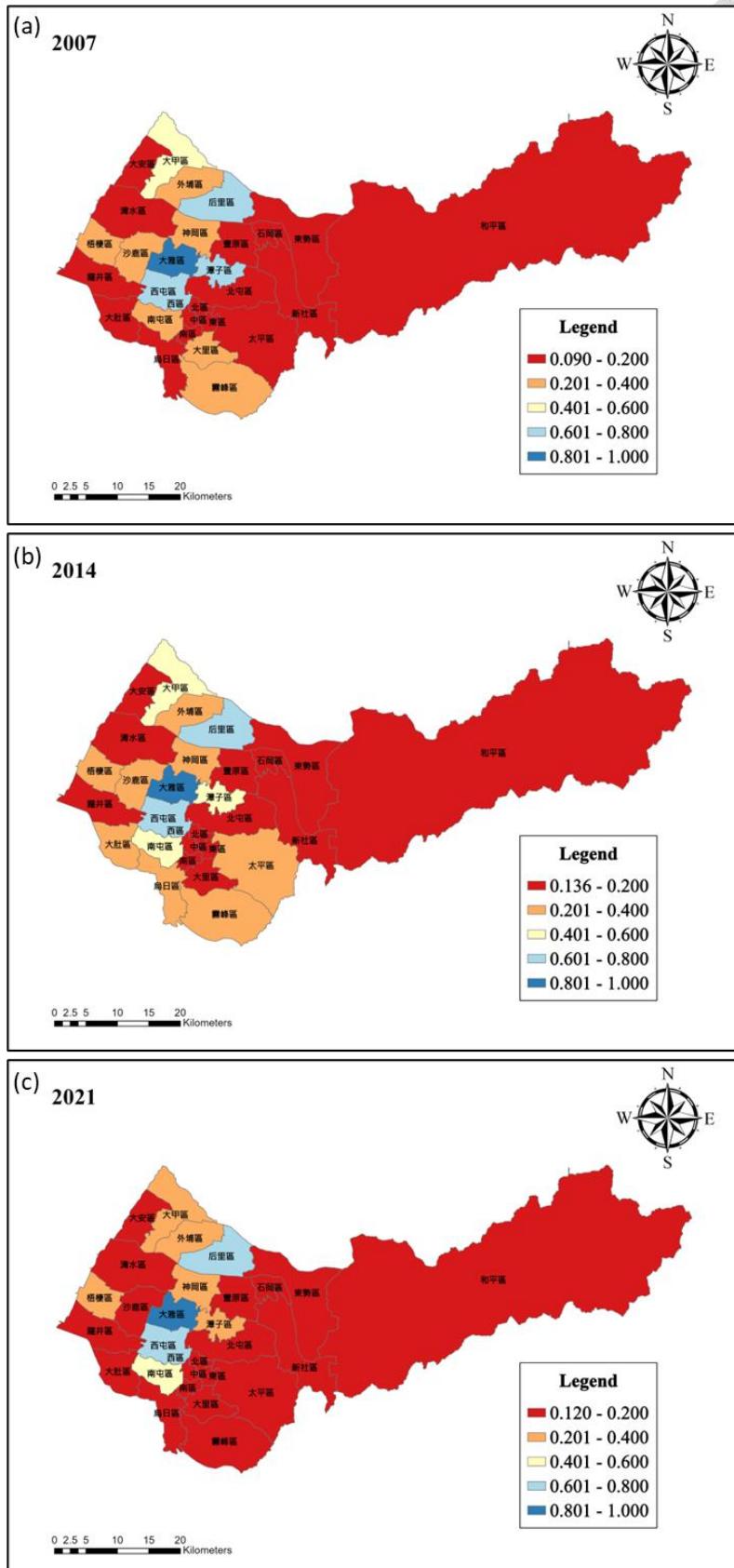


圖 39 臺中市能源子系統永續性指標分佈



### 4.2.3 糧食子系統

糧食子系統永續性指標的評估涵蓋人均種植面積、糧食耕地範圍、人均糧食產量、單位面積產出、化肥使用負荷及農業生產比值等面向。根據圖 40、圖 41 顯示臺中市在 2007 年、2014 年及 2021 年三個時間點中，糧食子系統永續性指標的空間分佈來看，整體僅有和平區具備高度永續性的單一優勢區域，而北屯、東勢、新社等地區的永續性水準在 2014 年後有些微之提升狀態後趨於穩定。

在 2007 年時僅有和平區呈現高永續性，其餘地區大多集中於 0.2 以下的低永續性區間。至 2014 年，東勢、新社、外埔、石岡區等屬於旱作及稻作型農業區的地區，其永續性有些微提升，進入 0.2-0.4 之間的中低永續性區段。到了 2021 年，除了和平區仍維持高永續性外，新社、東勢等山區型農業區表現也穩定依舊表現穩定；但大甲、外埔、霧峰區永續性降回 2007 年之水平。

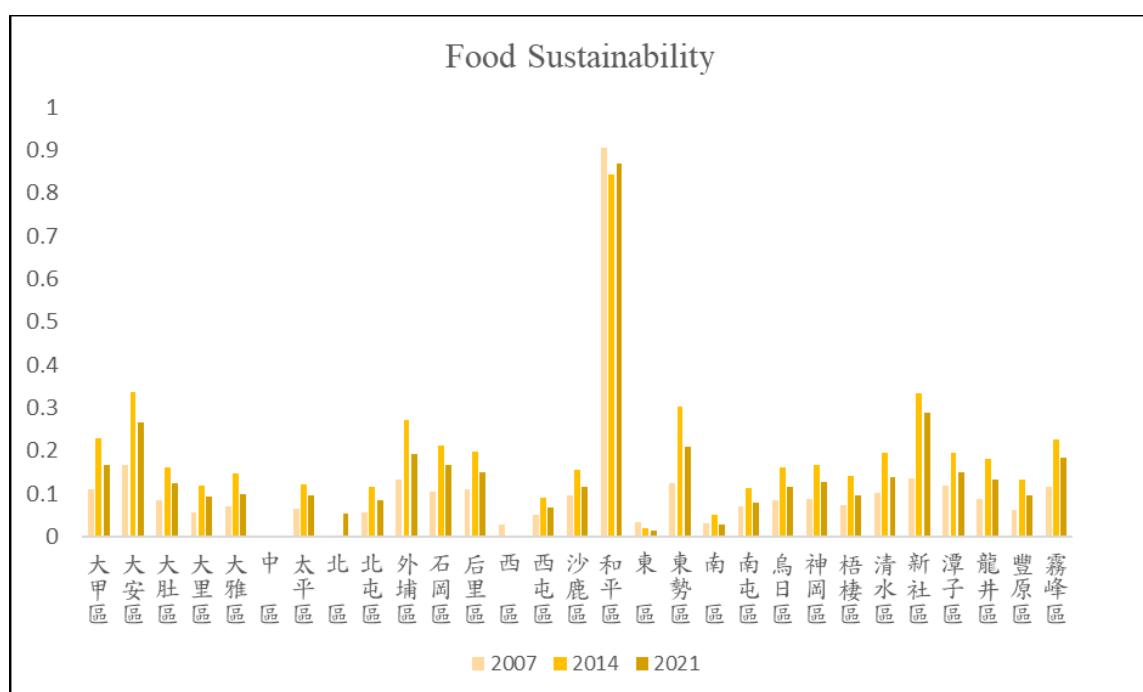


圖 40 臺中市各行政區 2007 年、2014 年、2021 年糧食子系統永續性

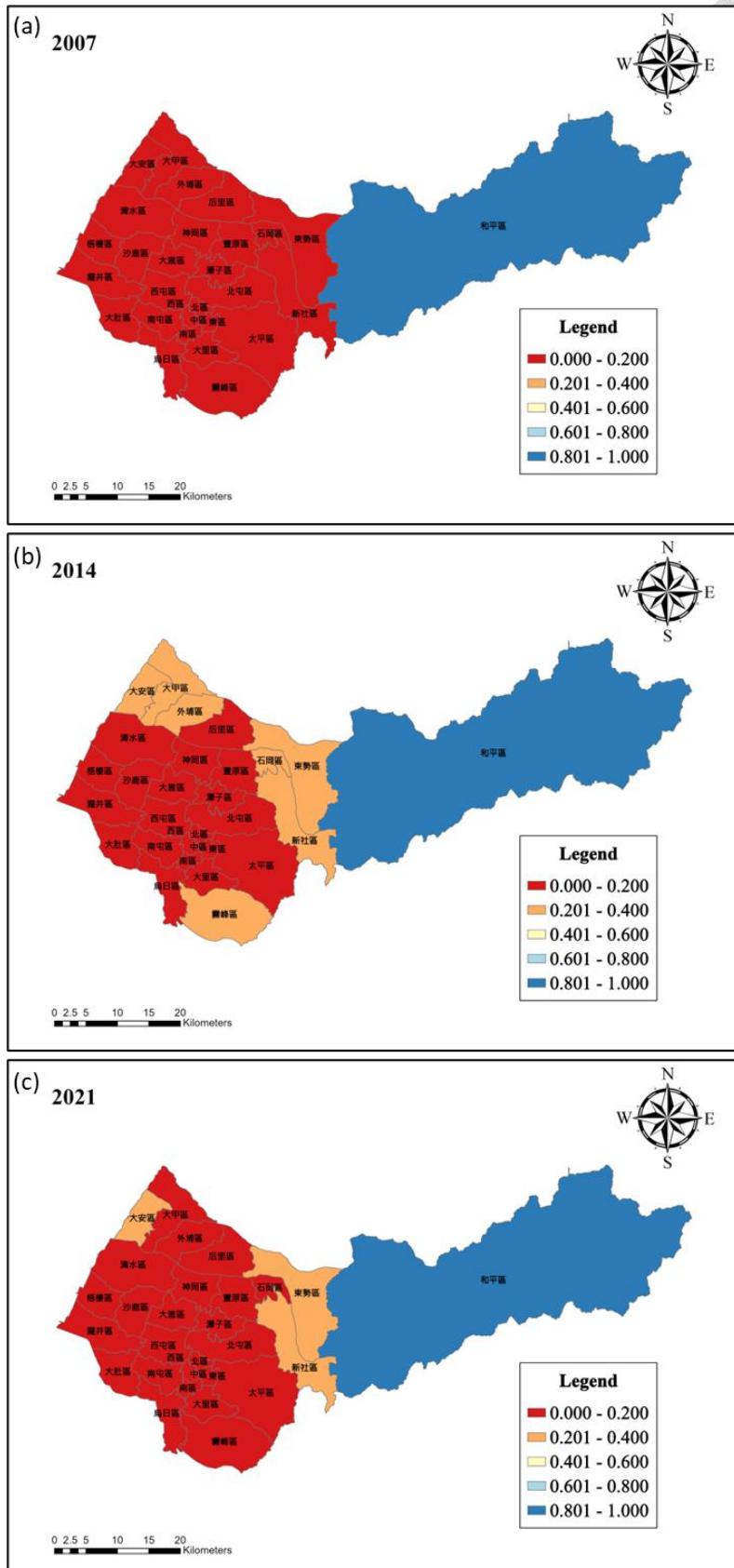


圖 41 臺中市糧食子系統永續性指標分佈



#### 4.2.4 WEF 永續性結果

根據圖 42 所示，臺中市 2007 年、2014 年與 2021 年三個年度的 WEF Nexus 永續性箱型圖，可觀察出水、能源與糧食三大子系統在不同時期的變化趨勢。整體而言，三者皆於 2014 年達到相對高點，惟 2021 年均出現不同程度之回落。首先，在水資源子系統方面，三個年份之永續性指標整體偏低，凸顯出區域水資源發展仍受限於結構性挑戰。儘管 2007 年平均值 0.106 至 2014 年 0.118 略有改善，2021 年則小幅回跌至 0.111，變動幅度有限，其發展相對穩定但成效不彰。變異程度亦偏低，反映出各行政區水資源永續性表現趨於一致。能源子系統在 2007 至 2014 年間和水資源子系統相似，平均值由 0.248 增至 0.279，然而 2021 年平均值降至 0.247，此結果亦與 T. Ding et al. (2023) 之研究結果一致。糧食子系統則展現較大波動性，2007 年永續性指標平均值僅為 0.109，至 2014 年大幅上升至 0.180，然而，2021 年指標下降至 0.144。WEF Nexus 2007 年、2014 年與 2021 年平均值分別為為 0.136、0.182、0.161，趨勢也相似三大子系統指標，在 2007 至 2014 年間呈現明顯提升，然自 2014 年起出現下降之趨勢，突顯各子系統間的聯動關係與挑戰仍需整合性策略應對，以維持區域永續發展的長期穩定性。

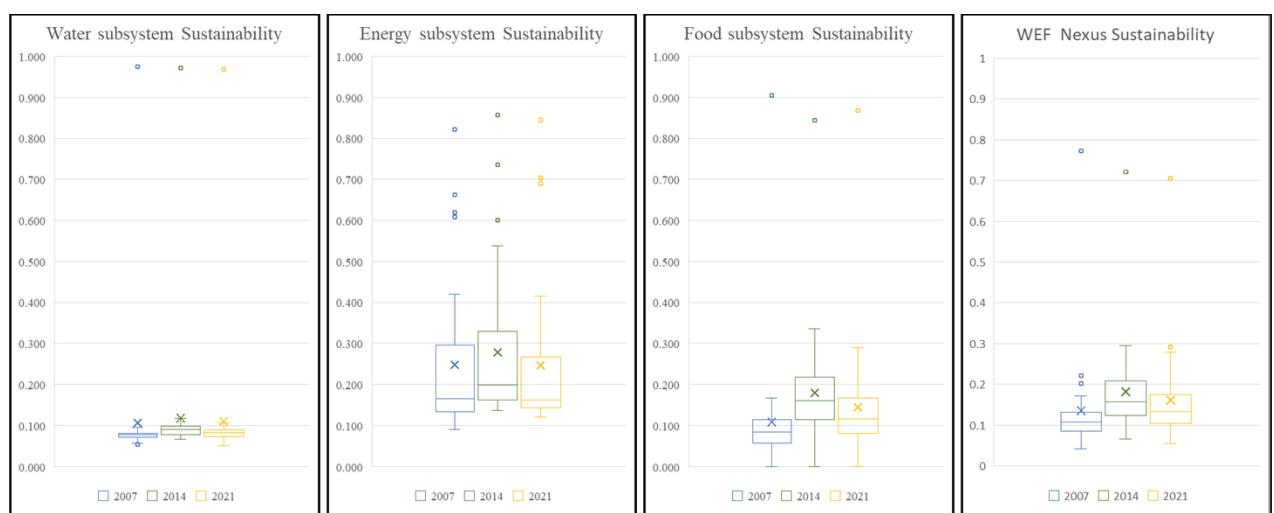


圖 42 臺中市 2007 年、2014 年、2021 年永續性



#### 4.2.5 生態系服務熱區與全臺中市之永續性

表 15 呈現臺中市 2007 年、2014 年、2021 年生態系服務綜合熱區範圍與全市在水、能源、糧食各子系統及整體 WEF Nexus 永續性之比較。結果顯示水子系統及糧食子系統在三年份中生態系服務綜合熱區範圍的永續性均大於整體臺中市的永續性，且水子系統生態系服務熱區的永續性由 2007 年的 0.829 穩步上升至 2021 年的 0.905，糧食系統生態系服務熱區的永續性亦由 2007 年的 0.772 上升至 2021 年的 0.815；而能源子系統在三年份中生態系服務熱區的永續性低於整體臺中市的永續性，但整體差距不大，且 2014 年曾達到相對高值 0.169。此結果主要為空間差異所導致，能源永續性主要集中於西部工業區，生態性服務熱區主要為集中於林地的和平區。整體 WEF Nexus 永續性評估的永續性評估結果亦顯示，綜合熱區範圍也在三年間皆表現出較高的永續性，反映出生態系服務熱區在水—能源—糧食永續上高度重疊。

表 15 臺中市 2007 至 2021 年生態系服務熱區與全臺中市 WEF Nexus 永續性比較

		Water	Energy	Food	WEF
2007	hotspot	0.829	0.140	0.772	0.663
	Whole	0.483	0.194	0.459	0.413
2014	hotspot	0.920	0.169	0.804	0.688
	Whole	0.489	0.225	0.486	0.422
2021	hotspot	0.905	0.148	0.815	0.664
	Whole	0.484	0.198	0.470	0.401

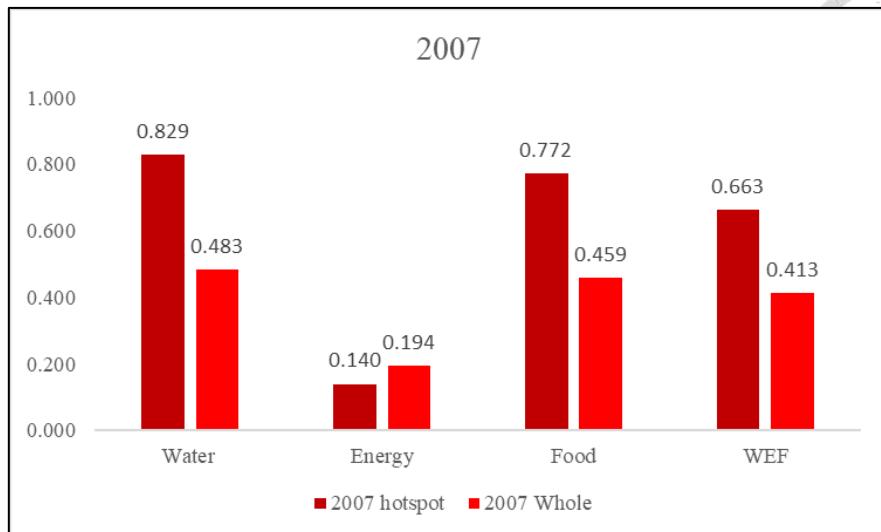


圖 43 臺中市 2007 年生態系服務熱區內與全臺中市之永續性比較

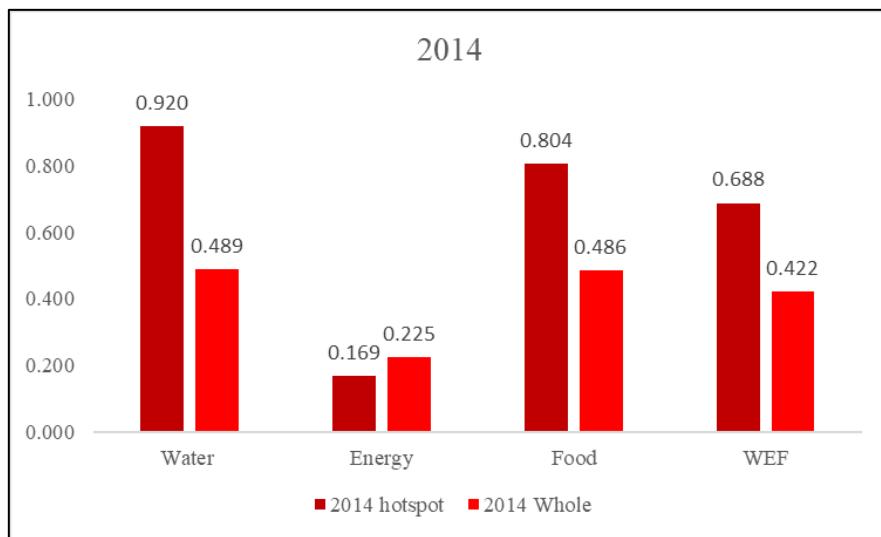


圖 44 臺中市 2014 年生態系服務熱區內與全臺中市之永續性比較

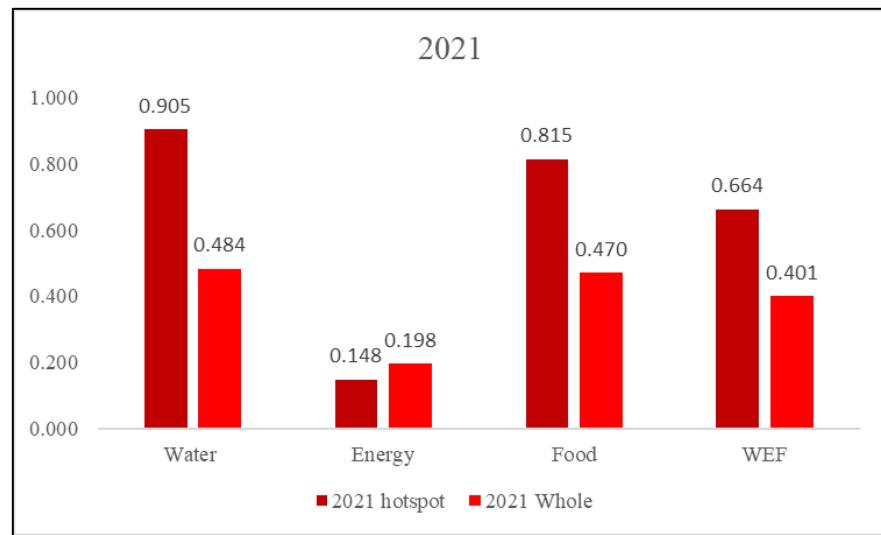


圖 45 臺中市 2021 年生態系服務熱區內與全臺中市之永續性比較

#### 4.2.6 WEF 永續性指標衡關係

表 16 為 2007、2014 及 2021 年臺中市 WEF Nexus 各子系統永續性指標之間的 Pearson 相關係數及其統計顯著性檢定結果。分析結果顯示，水子系統與糧食子系統在三個年份中永續性上均表現出顯著的協同關係，主要因農業區域常位於水資源豐沛且非都市化的區域，自然涵養與灌溉條件良好，形成兩者在資源與功能上的互補關係，共同促進永續發展。此外，水子系統與能源子系統則是均呈現弱競合關係值得注意的是，能源子系統與糧食子系統在 2007 年與 2014 年呈現近乎無相關的關係（相關係數分別為-0.089 與-0.091），但至 2021 年轉變為輕微的弱競合關係，(-0.157)。主因在於高能源效率區域多為都市與工業集中地，雖能源永續性佳，但伴隨高用水需求與污染風險，反而不利水資源永續；相對地，水資源條件佳的山區則因產業與能源基礎薄弱，能源永續性較低。

能源與糧食的關係則較不顯著，反映出都市化與產業發展強化能源永續性，卻壓縮農業空間，而農業區則因能源基礎設施不足與高耗能耕作方式，難以支撐能源永續目標，兩者在資源配置與發展策略上存在潛在衝突。

表 16 2007、2014、2021 年 WEF Nexus 永續性指標之間的 Pearson 相關係數

Pearson's Correlations 2007				
Variable	Water	Energy	Food	
Water	—			
Energy		-0.111	—	
Food	0.974***	-0.089	—	

Pearson's Correlations 2014				
Variable	Water	Energy	Food	
Water	—			
Energy		-0.136	—	
Food	0.843***	-0.091	—	

Pearson's Correlations 2021				
Variable	Water	Energy	Food	
Water	—			
Energy		-0.105	—	
Food	0.920***	-0.157	—	

\* p < .05, \*\* p < .01, \*\*\* p < .001

## 4.3 生態系服務與 WEF Nexus 永續性之間的關係評估

### 4.3.1 耦合協調度分析

本研究針對臺中市 29 個行政區進行各類生態系服務與的 WEF Nexus 永續性之耦合協調度分析，探討其時序變化與空間分佈特徵。圖 46 顯示臺中市各行政區產水量與 WEF Nexus 永續性之協調度空間分佈，產水量與 WEF Nexus 永續性之協調度接近產水量及雨量分佈變化，和平區於 2007 年與 2021 年呈現中度協調，2014 年則達到高度協調水準。相較之下，其餘行政區普遍處於不同程度的不協調狀態，尤以西部沿海地區最為顯著，推測與該年度降雨主要集中於東部山區而其餘各地雨量分佈較為分散有關。雖然 2014 年整體分佈趨勢與 2007 年類似，整體協調度則有所提升。該年和平區協調度最高，臺中山城地區（東勢、新社、石岡、后里）與大雅、潭子、西屯與南屯等行政區達輕度協調，中區顯示為中度不協調，其餘地區則呈現輕度不協調。至 2021 年，和平區協調度回落至中度協調，另外中區與大安區則呈中度不協調，其餘地區之協調狀況則與 2014 年相近變化幅度不大。

圖 47 為碳儲存與 WEF Nexus 永續性之協調度空間分佈圖，自 2007 年至 2021 年，和平區始終維持高度協調之狀態，反映該區豐富的森林覆蓋與穩定的自然資源循環體系，在碳儲存與水-能源-糧食系統的整合表現方面，顯著優於其他行政區。整體而言，期間內高至中度不協調區域逐漸減少，至 2021 年已有近半數行政區達到輕度協調，顯示整體資源鏈結機能有所提升。

圖 48 為作物生產與 WEF Nexus 永續性之協調度空間變化。和平區在三個年份中皆表現為高度不協調，反映其旱作農業規模有限且糧食自給能力低，導致與整體資源鏈結的協同性不足。2007 年，處於平原與丘陵過渡帶的東勢、新社與太平區顯現中度不協調現象，而西北部農業區則多呈現協調狀態。至 2014 年，多數行政區之協調度顯著改善，由高度或中度不協調轉為輕度不協調乃至協調，惟西屯與西區則出現協調性下降之逆轉趨勢。2021 年觀察結果顯示西南部部分行政區之協調度落至中度不協調，西北部有農業區分佈之行政區與 2014 年相似。

圖 49 及圖 50 分別展示氮與磷營養鹽留存與 WEF Nexus 永續性之協調度空間變化其整體變化趨勢大致一致。在 2007 年，多數行政區已展現協調性，其中和平區呈現高度協調，而北屯區、中區及南區周邊則顯示輕度不協調，其餘區域大多介

於輕度至中度協調間。至 2014 年，整體協調度有所提升，特別是中、西部地區，許多行政區由輕度協調進一步轉為中度協調，至 2021 年部分南部行政區的協調度略有下降，由中度轉為輕度協調，而原本協調性較弱的北屯區與南區則由輕度不協調改善為輕度協調。然而，在磷營養鹽留存的協調度上，2021 年后里、清水與大雅三區呈現高度協調，與氮營養鹽表現有所區別。

圖 51 為沉積物留存與 WEF Nexus 永續性之協調度，三個年份的所有行政區皆呈現高度不協調的狀態。

圖 52 為都市降溫與 WEF Nexus 永續性之協調度空間分佈。2007 年，和平區呈高度協調狀態，而北區、中區、南區及東區等都市中心區則處於中度不協調狀態，臺中山城地區（東勢、新社、石岡）及中北部農業地區（大甲、外埔、后里、豐原）呈現輕度協調，其餘多數行政區則為輕度不協調狀態。2014 年部分行政區顯示出協調度改善之趨，然而至 2021 年，輕度不協調之區域範圍再度擴張，趨近 2007 年之分佈狀況，值得注意的是，臺中山城地區自 2014 年起持續維持中度協調狀態，反映森林即山區與交錯之區域對都市降溫與永續目標具有一定貢獻。

總結，臺中市各類生態系服務與 WEF Nexus 永續性之耦合協調程度隨時間呈現出差異性趨勢與明顯空間異質性。和平區因其森林資源豐富與自然環境穩定，整體協調性較佳，而都市核心區與平原農業區則受限於土地利用壓力、水資源調配與糧食供應等因素，協調程度變動較大，部分生態系服務如沉積物留存長期處於不協調狀態。

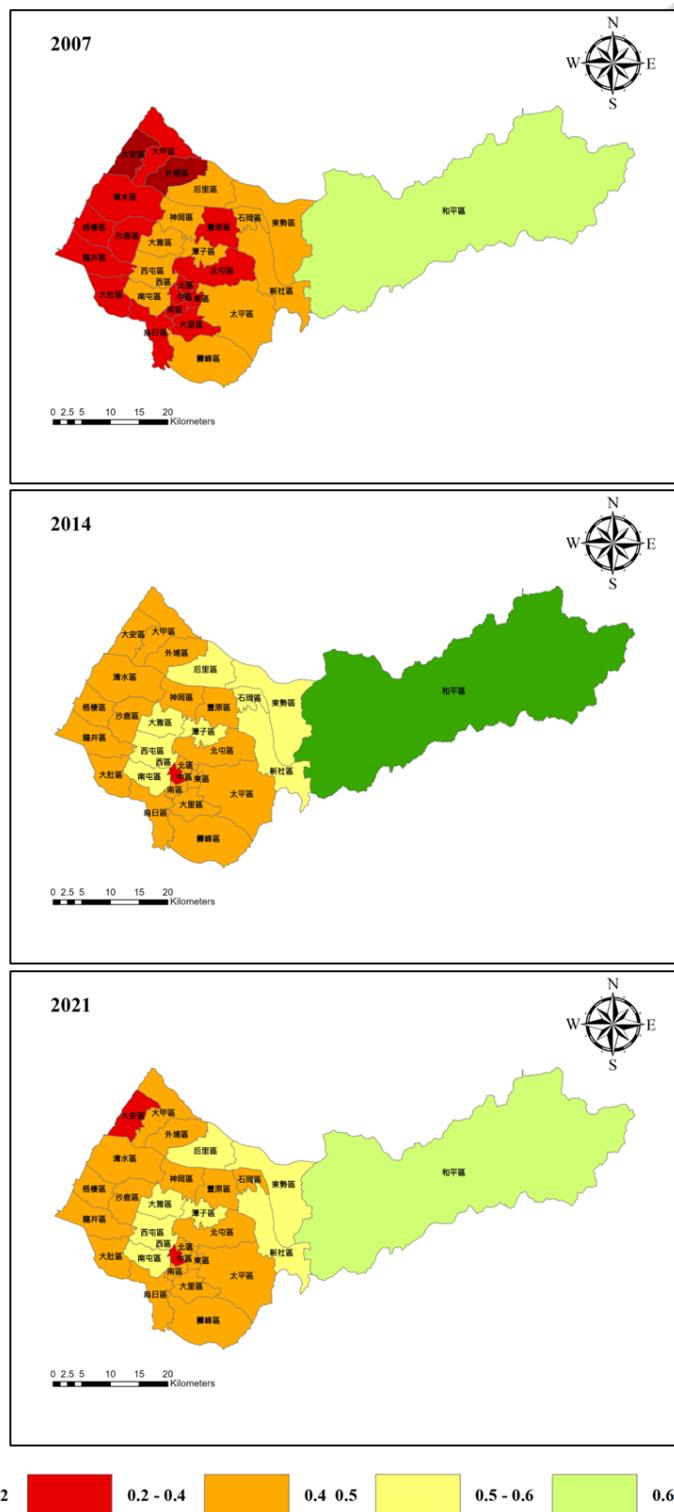


圖 46 2007 年、2014 年、2021 年產水量與 WEF Nexus 永續性之協調度

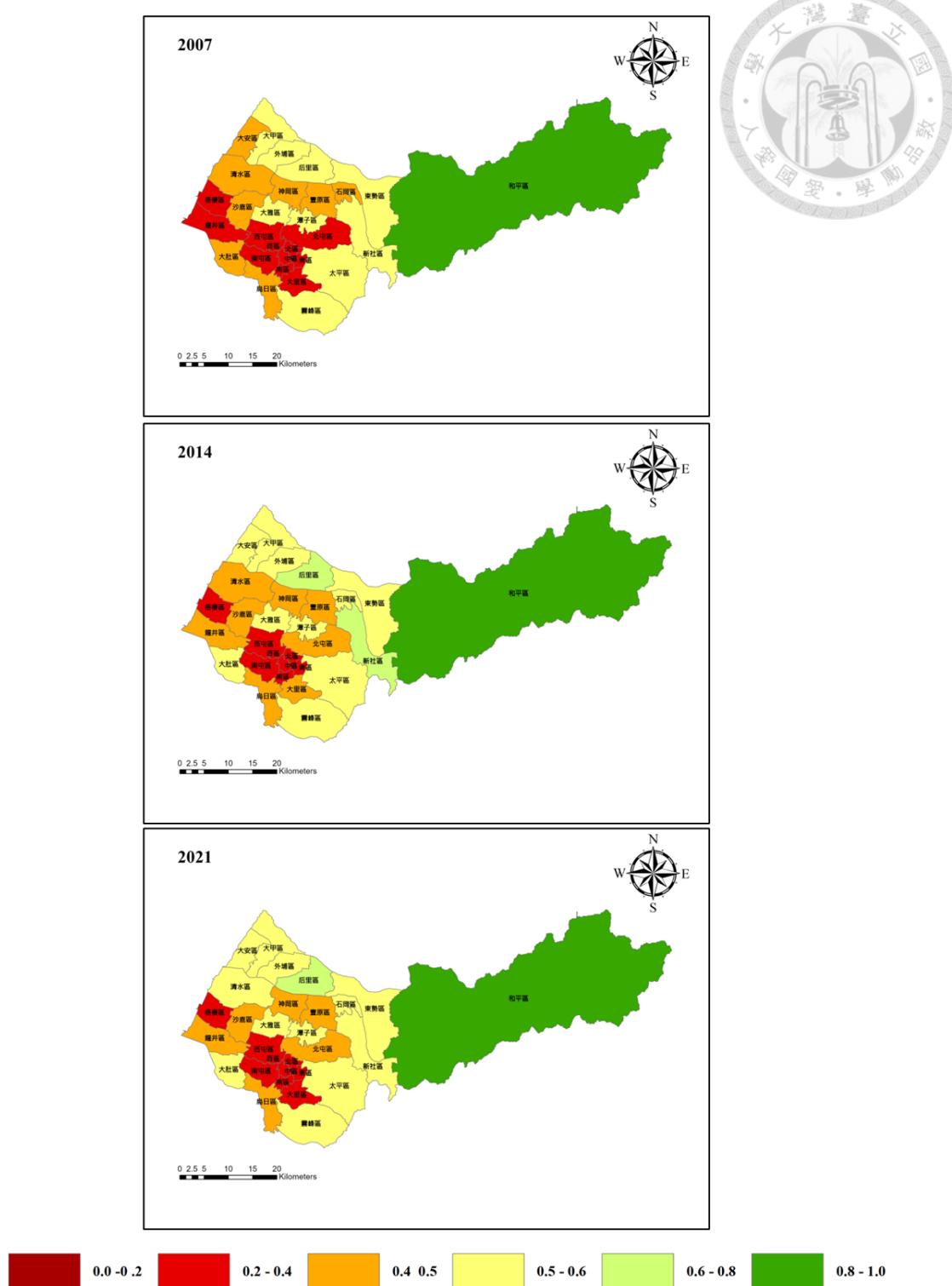


圖 47 2007 年、2014 年、2021 年碳儲存與 WEF Nexus 永續性之協調度

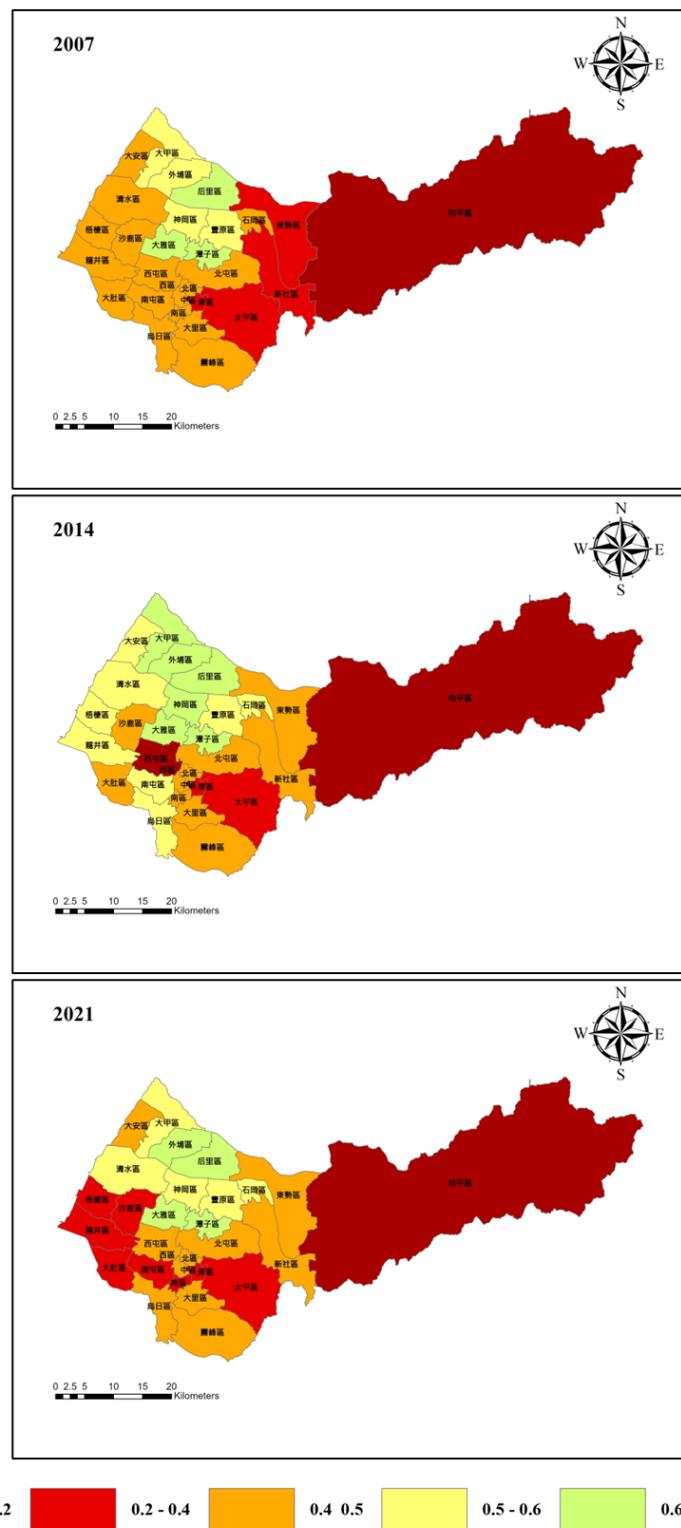


圖 48 2007 年、2014 年、2021 年作物生產與 WEF Nexus 永續性之協調度

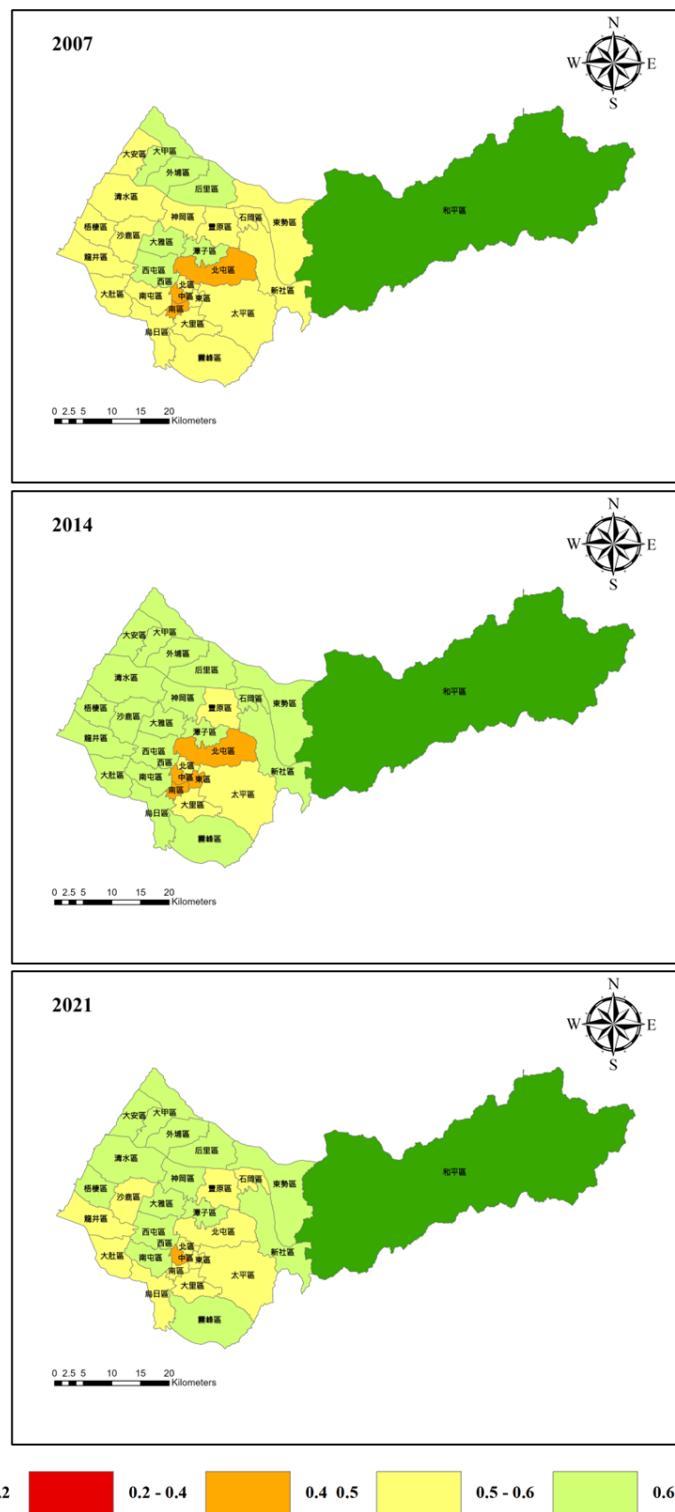


圖 49 2007 年、2014 年、2021 年氮營養鹽留存與 WEF Nexus 永續性之協調度

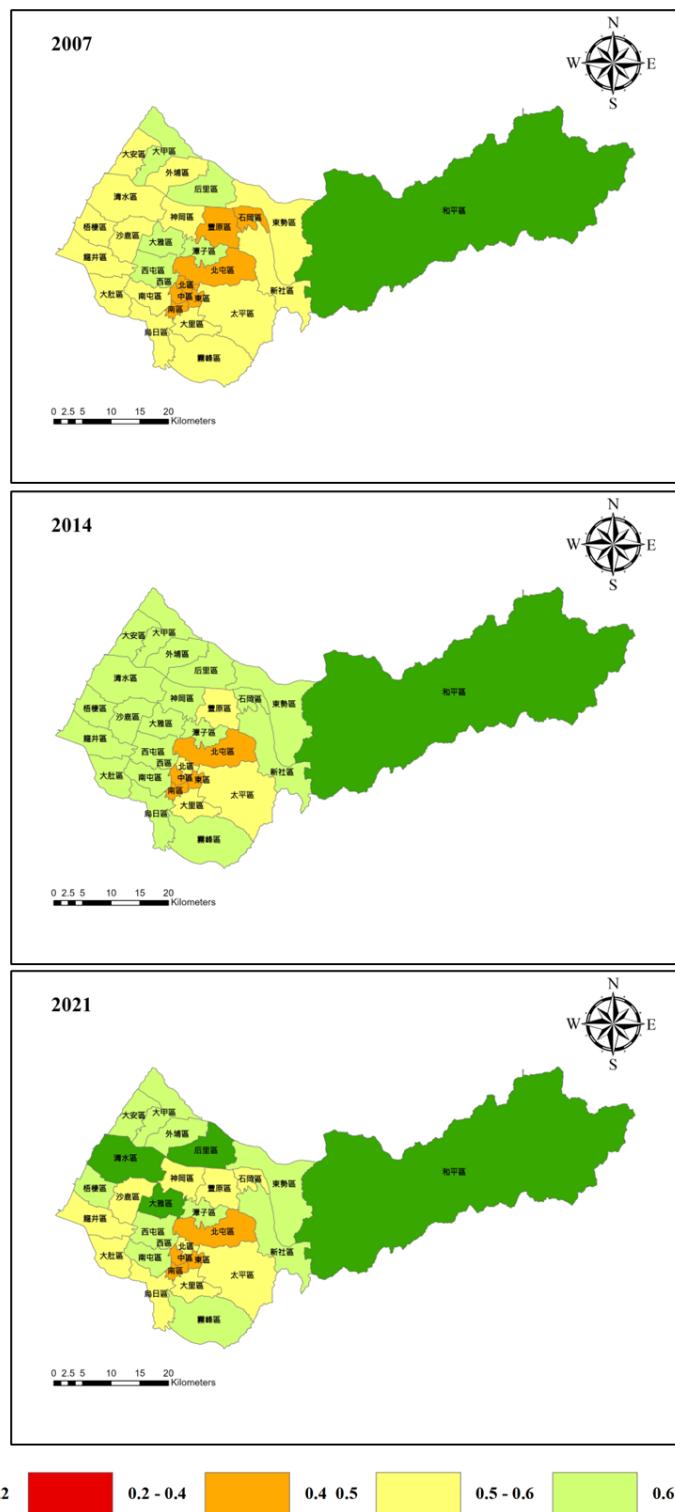


圖 50 2007 年、2014 年、2021 年磷營養鹽留存與 WEF Nexus 永續性之協調度

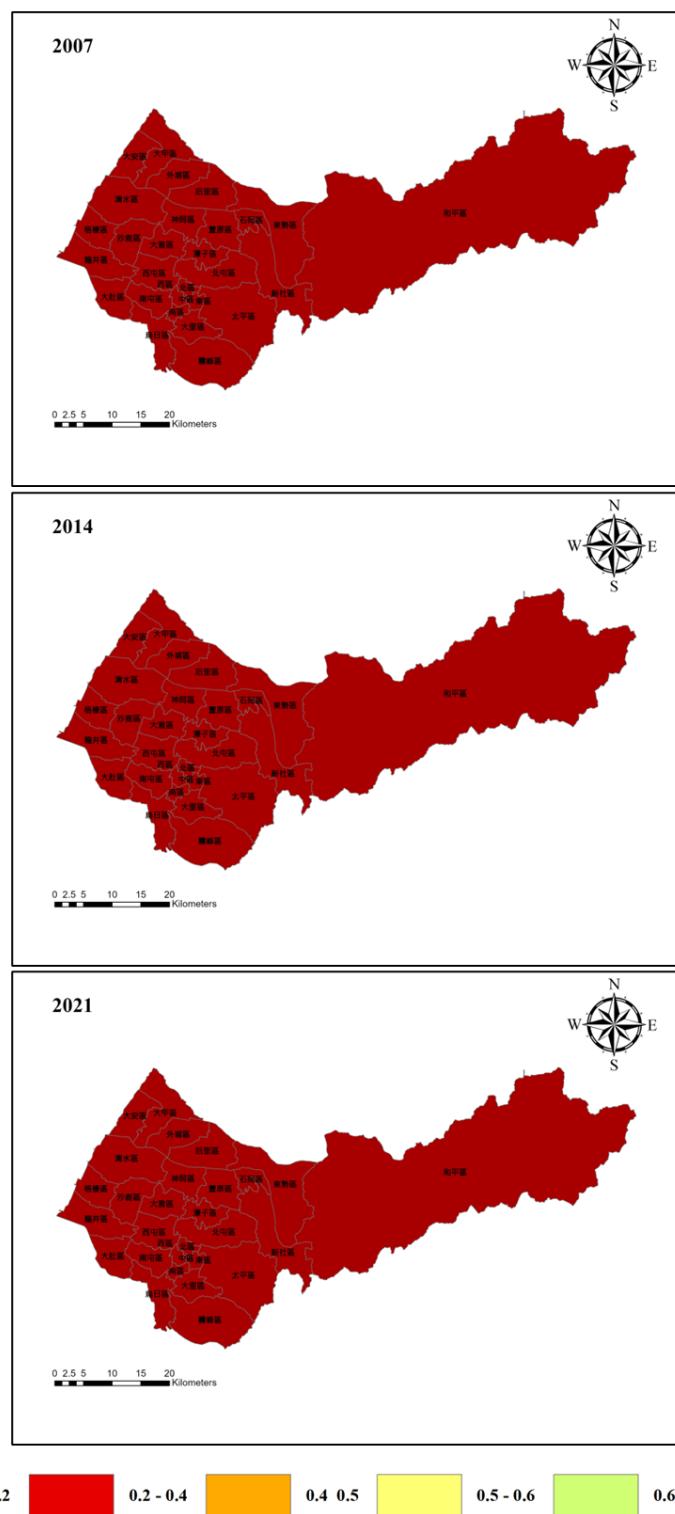


圖 51 2007 年、2014 年、2021 年沉積物留存與 WEF Nexus 永續性之協調度

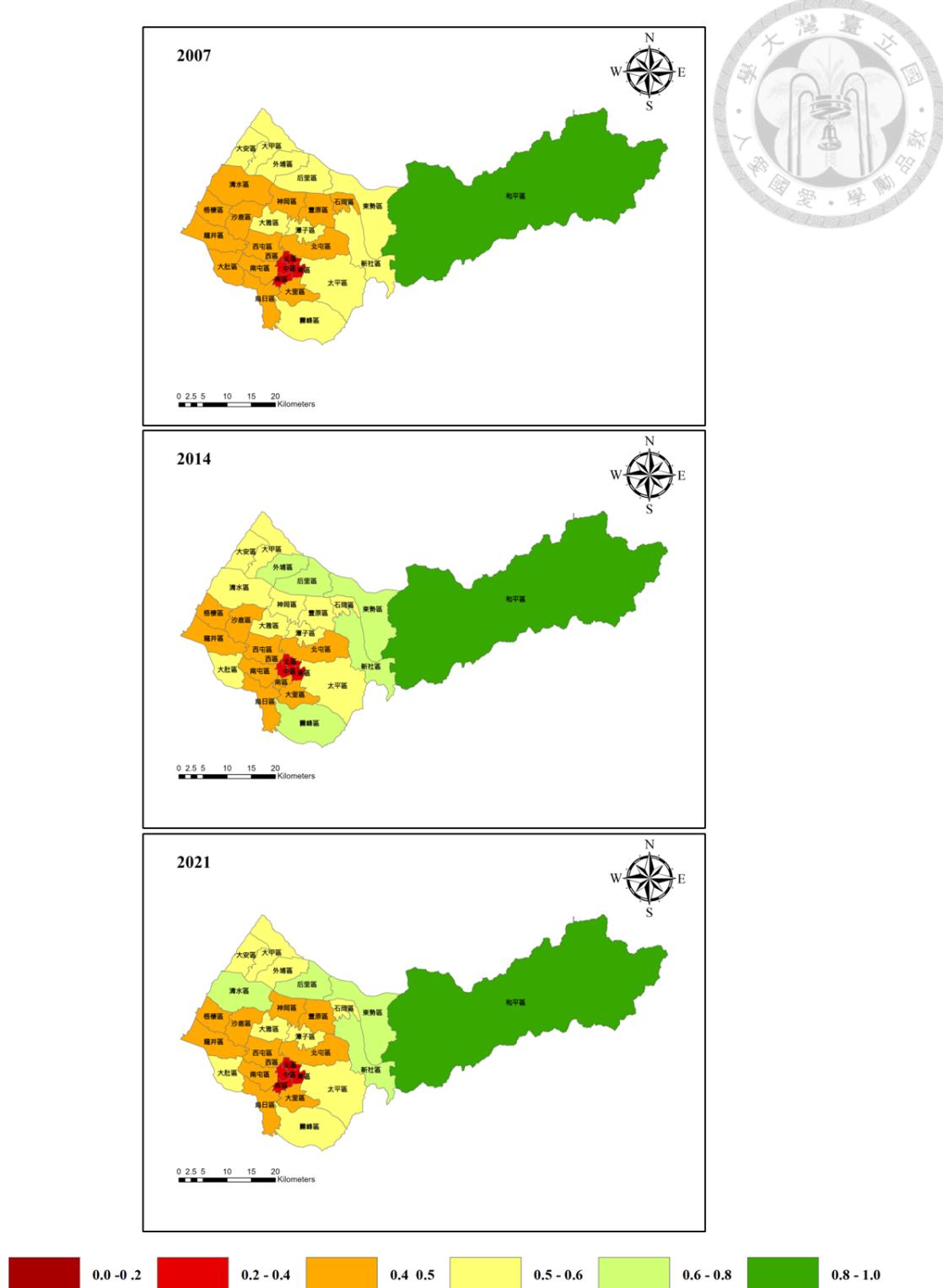


圖 52 2007 年、2014 年、2021 年都市降溫與 WEF Nexus 永續性之協調度



### 4.3.2 生態系服務與 WEF Nexus 永續性之間的權衡關係

根據表 17 至表 19 所呈現的 2007 年、2014 年與 2021 年間生態系服務與 WEF Nexus 永續性三大子系統間之 Pearson 相關係數進行分析，以探討其潛在交互關聯性，並透過  $p$  值進行統計檢定以確認相關性之顯著性。

在 2007 年，水子系統與作物生產呈現弱競合關係，但未達顯著水準；與氮、磷營養鹽留存則展現中度協同，並與其他生態系服務如碳儲存、產水量、沉積物留存、都市降溫呈高度顯著協同關係。能源子系統方面，唯有與作物生產顯示高度顯著協同關係，其餘生態系服務則多呈現不顯著弱競合關係。至於糧食子系統，雖與作物生產呈現弱競合關係但未達顯著水準；與氮、磷營養鹽留存間為中度協同，與其他生態系服務呈現高度顯著協同關係。2014 年之關聯性結果大致延續 2007 年之趨勢，只有部分細節出現調整。糧食子系統與作物生產的關聯性由弱競合轉為無顯著相關，此外，原本與氮、磷營養鹽留存間的中度協同亦轉變為弱競合關係，其餘子系統與生態系服務之間的關係則多數維持原有趨勢。至 2021 年，水子系統與作物生產仍呈弱競合關係；與產水量的關聯則由高度顯著協同轉為無顯著相關，能源子系統方面，與氮、磷營養鹽留存的原有弱競合關係轉為無顯著相關，糧食子系統則與作物生產重新呈現弱競合關係但不顯著，且與產水量由高度顯著協同關係降至弱競合關係。

綜觀三個時期的分析結果，水子系統與糧食子系統普遍與碳儲存、沉積物留存、都市降溫等生態系服務呈現中至高度顯著協同關係；反觀能源子系統則僅與作物生產穩定呈現顯著協同相關，與其他生態服務關聯較弱。作物生產與水及糧食子系統整體呈現弱競合或無相關。

表 17 2007 年生態系服務與 WEF Nexus 永續性指標之間的 Pearson 相關係數

Pearson's Correlations 2007 年			
Variable	Water	Energy	Food
Food production	-0.187	0.521 **	-0.141
Carbon storage	0.803 ***	-0.227	0.801 ***
SDR	0.980 ***	-0.150	0.962 ***
NDR_n	0.420 **	-0.212	0.266 *
NDR_p	0.372 **	-0.171	0.221
Urban Cooling	0.665 ***	-0.250	0.672 ***
Water Yield	0.820 ***	-0.234	0.831 ***

\* p < .05, \*\* p < .01, \*\*\* p < .001

表 18 2014 年生態系服務與 WEF Nexus 永續性指標之間的 Pearson 相關係數

Pearson's Correlations 2014 年			
Variable	Water	Energy	Food
Food production	-0.192	0.514 **	-0.065
Carbon storage	0.861 ***	-0.222	0.788 ***
SDR	0.958 ***	-0.202	0.861 ***
NDR_n	0.336	-0.198	-0.114
NDR_p	0.312	-0.181	-0.144
Urban Cooling	0.718 ***	-0.247	0.697 ***
Water Yield	0.510 ***	-0.261	0.639 ***

\* p < .05, \*\* p < .01, \*\*\* p < .001

表 19 2021 年生態系服務與 WEF Nexus 永續性指標之間的 Pearson 相關係數

Pearson's Correlations 2021 年			
Variable	Water	Energy	Food
Food production	-0.181	0.514 **	-0.121
Carbon storage	0.851 ***	-0.217	0.931 ***
SDR	0.959 ***	-0.181	0.909 ***
NDR_n	0.850 ***	-0.097	0.748 ***
NDR_p	0.821 ***	-0.040	0.737 ***
Urban Cooling	0.712 ***	-0.233	0.729 ***
Water Yield	0.011	-0.209	-0.191

\* p < .05, \*\* p < .01, \*\*\* p < .001

## 第五章、結果討論



### 5.1 生態系服務

#### 5.1.1 產水量

研究發現自 2007 年至 2021 年間，臺中市的產水量及降雨量呈現由東部山區逐漸向西部都市邊緣遷移的現象，部分高產水量區域更接近城市地帶，不再僅限於自然林地區域。這一現象與美國國家科學院院刊 (PNAS) 發表的一項利用衛星觀測資料分析全球 1056 個城市及其周邊地區降雨變化研究相互呼應。該研究指出多達 63%的城市及周邊區域年降雨量顯著高於鄰近鄉村地區，形成所謂「都市降雨效應」。成因包含城市建築與鋪面改變地表熱傳導特性及地形紋理，並伴隨工業排放及交通活動釋放的氣膠微粒，促進水氣凝結與降雨集中，導致降雨集中於都市區。臺中市近年來降雨逐漸由東部山區向西部都市區集中，亦可能反映都市擴張引發的局部氣候變異，亦與全球其他地區相似，如大台北地區已被列為全球降雨異常增幅最高的六大區域之一，進一步凸顯都市化對區域水文與氣候系統的深遠影響。

此外，本研究也驗證了產水量的空間分布與地表植被覆蓋、地形特徵及降雨分佈之間的高度一致性，產水功能主要集中於具備良好森林覆蓋與地形起伏的山區林地。這些結果與 Bai et al. (2019)、周品樺 (2024) 及 張宸瑄 (2024) 等相關研究結果相互印證。Bai et al. (2019) 針對美國肯塔基州的研究指出，林地普遍具備最高的保水能力，但在不同生態區間仍存在差異，尤其中部的森林地區因受降水量與坡度空間異質性影響，其保水功能最為顯著。周品樺 (2024) 研究針對臺灣陳有蘭溪流域則發現 2007、2014 及 2020 年產水量與該年度降雨分布高度相似，空間上大致為南高北低，且由南向北遞減的趨勢，山區因降雨豐沛且溫度較低，蒸發散量有限，因此產水量表現較高，而 2014 年及 2020 年由於該年梅雨季短且無颱風登陸導致風水及降雨量極少，整體產水量偏低。張宸瑄 (2024) 針對臺灣桃園地區研究亦指出，2007 年及 2021 年產水量熱區集均中於復興區及大溪山區等以林地為主的地帶，然而 2014 年由於降雨分布空間上的變化導致產水量下降且集中於都市區。Dai et al. (2020) 跟 Y. Wang et al. (2022) 也分別研究了氣候和土地利用變化對橫斷面山區和中國大陸東北地區水量和土壤侵蝕的影響。前者的論文研究了 1990 年至 2015

年之間的差異，得出結論，氣候變遷在總水量的減少中起著決定性的作用（佔觀測到的變化的 73%），主要是由於降水強度的變化。後者應用到了 2050 年代的未來情景，並報告了與研究中考慮的兩個因素相關的水量減少（氣候變遷導致水量減少約 3%），並建議政府制定土地利用和生態管理政策，以應對未來的環境變化。

綜上本研究結果再次強調了地形起伏、植被覆蓋與降雨條件對區域產水功能的重要性，也提示未來在面對都市化與氣候變遷挑戰時，需更加重視高產水潛能區的生態保育與土地利用規劃，亦需作為未來水資源管理的重要考量。

### 5.1.2 碳儲存

自然植被類型在碳儲存能力呈現明顯差異，其中以林地具有最高碳儲存能力，依序為草地、旱作地及稻作地。本研究結果顯示，臺中市碳儲存量於 2007、2014 及 2021 年均穩定集中於東部山區，尤以和平區、東勢區與新社區最為顯著，且主要由林地提供最高碳儲存功能。進一步分析資料可知，約 50% 的臺中市土地屬於林地利用類型，且碳儲存熱點中有 79 % 由林地構成，凸顯森林在區域碳平衡與碳匯服務中的關鍵角色。

本研究關於碳儲存量的空間分佈與變化趨勢之觀察，與國內外相關研究結果高度一致。He, Yunlin (2023) 應用 InVEST 模型碳儲量模組分析桂林市 2005 年至 2020 年間碳儲存變化，結果顯示碳儲量高值區主要分佈於西北部海拔較高、植被覆蓋良好的地帶，碳儲量密度最高達  $260 \text{ t}/\text{hm}^2$ ；而中部地區則因土地開發與建設活動集中，碳儲量偏低。整體而言，桂林市碳總儲量呈逐年下降趨勢，累積減少 4.51 Tg，且減少面積遠大於增加面積。突顯人為干擾與植被破壞對碳儲存功能之影響，與本研究中觀察到臺中市都市化區域碳儲存量偏低，且碳儲高值區集中於東部山區森林地帶的現象相呼應。進一步對照其他研究，T. Ding et al. (2023) 對浙江與安徽地區的研究亦指出，碳儲量高值區與天然林及竹林分佈密切相關，天然植被在單位面積上的碳固定效能明顯優於半自然地或人工利用地，進一步驗證本研究中林地碳儲功能優勢之觀察。Qiu, Zhang, Han, Cheng, and Kang (2023) 對中國黃土高原的長期觀測亦證實，高碳儲值主要集中於闊葉林、針葉林及灌木植被帶，而裸露地與城市開發區域則碳儲能力較弱，與臺中市森林地碳儲存高，都市地區碳儲存



功能較低的模式相互印證。此外，L. Chen et al. (2024)對成都市的研究亦顯示，碳儲存量主要受植被覆蓋率驅動，中心城區碳匯能力明顯不足，高碳儲量區則集中於西南與東北部森林茂密地帶，此分佈特徵亦與本研究中東部山區碳儲存熱點分佈結果高度契合。

自然植被類型、尤其是森林地，對碳儲存與碳匯功能具有關鍵貢獻，而都市化發展則普遍導致碳儲存功能衰退。臺中市的空間分佈特徵與這一國際趨勢一致，進一步印證了森林保護及合理土地利用規劃對於強化區域碳儲能量與達成碳中和目標的重要性。

### 5.1.3 作物生產

關於作物生產的空間分佈與變化趨勢之觀察，與國內外相關研究結果一致。T. Ding et al. (2023) 指出，作物生產主要集中於長三角地區北部的廣大耕地區，如鹽城、滁州與合肥等地，其生產力受惠於耕地面積廣泛與農業條件優越；相對地，南部丘陵地區則因地形限制與耕地稀少而表現出較低的產量。類似的區域性分佈也出現在桃園市，根據張宸瑄 (2024)研究，桃園市的作物生產熱點集中於新屋、楊梅、大園等農業發展區，稻作與旱地作物（如甘薯）多分佈於沿海地區，而都會與森林山區則幾無作物生產。而在本研究中的臺中市則呈現由西部平原至東部山地邊緣的農業帶分佈型態，除西部為主要農業核心外，德基水庫周圍亦零星分佈旱作地。大致上作物生產熱區皆與高密度農業利用土地密切對應，惟因地形與行政區劃差異，熱點位置呈現局部差異性。

值得注意的是，本研究以水稻與梨樹作為代表性作物，模擬結果顯示作物生產熱區集中於西部平原地帶，與現地主要稻作與旱作農地的配置相符；然而，和平區雖具旱作地分佈，卻因其範圍零散且面積有限，在 LISA 热區分析中未呈現顯著生產聚落，導致模擬結果與實際作物分佈略有落差。此結果凸顯在評估山區土地開發潛力（例如高山蔬果與茶樹栽種）與自然生態系服務權衡時，僅依據總產量進行分析可能不足，亦需納入不同地區對作物生產需求的空間差異，方能提供更精準的政策建議與資源配置依據。



### 5.1.4 營養鹽留存

本研究透過將 InVEST 模型所計算之營養鹽輸出量進行逆標準化轉換，以反映各地區的營養鹽留存能力，輸出量越低者，代表其營養鹽留存功能越強。結果顯示，農業活動與土地利用類型對氮、磷營養鹽的輸出與留存具關鍵影響，營養鹽輸出主要集中於旱作地及稻作地，其中氮營養鹽輸出量普遍高於磷營養鹽，呈現明顯的土地利用類型差異，營養鹽留存能力較佳區域主要在林地及草地人為干擾較低的地區。Y. Lu and Qin (2024)研究了中國淮河流域 1980 年至 2018 年間總氮 (TN) 和總磷 (TP) 負荷與輸出的時空變化，重點關注農業肥料、畜禽養殖及農村生活污水的非點源污染對水質的影響。結果表明，降水和土地利用與覆蓋等單一因素是驅動 1980-2018 年 HRW 流域 TN 和 TP 輸出時空變化的最重要因素。同時，土地利用與覆蓋與其他因素相互作用的貢獻率在同一時期在該流域始終最高。且 TN 和 TP 的主要輸出區域集中在淮河流域中游的糧食生產區，這些地區農業肥料使用量高。此結果與本研究之營養鹽輸出量相符，以農業用地特別是以稻作為主的區域，其氮、磷等營養鹽的輸出量普遍較高。T. Ding et al. (2023)針對長三角地區的研究結果一致，其指出氮輸出高值區集中於東北部與東南部的耕地與開發用地，而森林覆蓋區則維持穩定且極低的氮輸出水平，強調天然植被在養分控制與污染防治中的重要作用。Bai et al. (2019) 針對肯塔基州 1992 年至 2011 年間的研究亦指出，氮、磷營養鹽輸出總量皆呈現上升趨勢，且主要熱點分佈於西部耕地及中部牧場區域，東部山地與中部南部地區則呈現輕微下降。土地利用型態明顯影響營養鹽輸出格局，其中林地展現最低的養分輸出強度，並隨時間保持相對穩定。相較之下，耕地區域則因農業活動密集，成為主要的養分輸出來源區。

而營養鹽留存能力結果以林地及草地等較少人為干擾之區域最高，與周品樺 (2024) 、B. Han, Reidy, and Li (2021) 及 Weitzman and Kaye (2016) 相同。

周品樺 (2024)研究陳有蘭溪流域內的氮、磷營養鹽高輸出量區域主要為河道兩側之農地，氮營養鹽的排放量較高且輸出範圍相較於磷營養鹽更廣。林地及草地具有良好的過濾功能，氮、磷營養鹽大約有 92% 的熱點屬於林地，其次約有 5% 屬於草地。B. Han et al. (2021) 探討了一種簡單易行的建模方法，利用美國印第安納州白河流域的土地利用情境，模擬氮和磷的營養物負荷與輸送。採用 InVEST 生態系

統服務模型中的營養輸送率（NDR）模型，並結合文獻中的輸出係數數據進行校準，分析不同土地利用情境對營養物釋放的影響及其敏感區域。結果顯示，農業用地是營養物釋放的主要來源，而森林具有較高的營養物保持能力。強調非點源汙染是營養鹽負荷的主要來源，尤其是在農業密集區域。Weitzman and Kaye (2016)探討不同土地利用類型（森林、城市、農業）對土壤氮保留的途徑與穩定性之影響，結果顯示，森林系統具有最高的穩定氮保留能力，主要由非生物過程驅動，隨後根系吸收成為主要機制。城市系統次之，城市土壤氮保留率高，微生物固定率和根系氮吸收量最高，短期內氮滯留率高。農業系統氮保留能力最低，穩定氮形成率低，幾乎無法滯留新增氮，主要原因是高氮輸入和土壤擾動。研究還指出，氮的穩定性形成主要受土地利用歷史、土壤擾動程度及氮輸入量影響。以上文獻皆與本研究結果相符相印證。

### 5.1.5 沉積物留存

InVEST 模型中沉積物留存的估算會因年份不同而受到降雨量、土地利用類型、土壤沖蝕性與降雨沖蝕係數等變動因子的影響。結果顯示，沉積物留存高值區長期穩定集中於東部山區，特別是在和平區等地勢起伏大且森林覆蓋良好的地帶，並向平原交界處延伸。此空間格局與國內研究結果高度一致，如周品樺 (2024)指出，陳有蘭溪流域中上游林地因林木覆蓋強化了對土壤的保護作用，顯著降低了降雨沖蝕造成的土壤流失，因此其沉積物留存能力優於其他土地利用類型；張宸瑄 (2024)亦指出，沉積物留存表現最強的區域主要分佈於山地，突顯森林地在水土保持中的關鍵角色。

國際研究亦提供相似觀察，Bai et al. (2019)應用 InVEST 模型分析美國肯塔基州 1992 年至 2011 年間土壤保持能力之變化，發現整體保有量增幅達 12.24%，其中森林擴張明顯的西部地區增幅高達 32.41%。該研究確認森林為土壤保持效能最佳的土地類型，且地形條件顯著影響沉積物留存效率，特別是在高起伏與良好植被覆蓋的區域，其平均保有量可達 10.26 噸/公頃。T. Ding, Chen, Fang, and Chen (2021)亦指出，中國長三角地區沉積物留存高值區集中於浙江西南部之天然植被密集區，顯示森林不僅有助於穩定土壤，也能有效減緩都市化進程所造成的水土流失風險。Woznicki et al. (2020)探討美國本土自然景觀的沉積物滯留與土壤侵蝕的相關研究，

並利用修正通用土壤流失公式(RUSLE)及沉積物傳遞比率(SDR)模型進行分析。研究發現，農業地區和地形複雜的地區(如玉米帶和太平洋沿岸)土壤流失率最高。自然植被(如森林和濕地)對沉積物滯留的貢獻顯著，尤以常綠林和落葉林的效益最大。高坡度、高降雨量和靠近水體的地區，自然植被的沉積物滯留價值更高。研究指出，若自然植被被轉換為裸地，沉積物滯留效益將大幅下降，對水體影響顯著。

儘管臺中市沉積物留存熱區分佈相對穩定，然從 2007 年至 2021 年間整體沉積物留存量呈現下降趨勢，初步推測與同期降雨量減少、土地利用變遷與都市化擴張密切相關。此一變化趨勢與 Bai et al. (2019)、Woznicki et al. (2020)及 T. Ding et al. (2021)於美國與中國地區觀察到的現象一致，亦顯示即便部分區域保持森林覆蓋，若整體空間格局受開發影響，仍可能導致土壤保持效益下降。森林覆蓋度與地形特徵為影響沉積物留存功能的關鍵因素，未來在氣候變遷與都市發展與生態保育權衡規劃的依據，特別是在編製國土功能分區、自然資源保護、氣候調適策略及農地變更審議等政策層面，提供量化與空間化的決策支援。

### 5.1.6 都市降溫

近幾十年來，全球多數高度發達的城市出現了明顯的暖化現象，而人口稠密、受季風氣候與複雜山地地形共同影響的臺灣尤為明顯，過去一世紀平均氣溫已上升約 1.0–1.4 °C，遠高於全球均值。Tsai, Lin, and Tung (2024)研究指出，熱浪事件的增頻與強度與快速城市化、人口高密度與不透水建物覆蓋增加密切相關；在臺灣，大量高樓與緻密街廓削弱了通風與散熱，建築密度、人口分布與土地利用模式的空間差異，共同強化了都市熱島效應，進而提高都市居民面臨的熱浪風險。

本研究利用 InVEST 模型評估臺中市都市降溫服務的時空分佈特徵與效能變化，結果發現自然土地覆蓋，尤其是林地對都市熱環境調節具有顯著作用，約 85.4% 的都市降溫熱點集中於林地，其餘土地利用類型熱點僅佔 14.6%，而其中建地占 3%。熱調適指數 (HMI) 進一步說明不同地區與土地型態的降溫效益。和平區作為臺中市東部山區、林地密集之行政區，於 2007 至 2021 年間皆穩定維持於 0.943 至 0.946 之高水平，反映該區域自然地景在熱環境調節方面的穩定性與高效性。與之相對，都市中心區域(包括中區、東區、西區、南區、北區、南屯、西屯與北屯區)之 HMI 值在三個時點分別為 0.419、0.395 及 0.398，都市建地因綠覆率低、不

透水面積大，降溫能力相對有限，整體表現明顯低於山區，反映自然地景在熱環境調節上的優勢。

類似結果亦可從 Yuxin Zhang, Fu, and Sun (2022)研究探討長江上游地區山區在減緩高溫熱浪方面的作用，並分析影響的主要因素，如降水、海拔、地形起伏、植被覆蓋率及土壤濕度。此外，研究提出山區具有緩解熱浪的優勢，例如海拔較高、地形多樣及降水較多，這些特性有助於抵禦熱浪。可利用山區特性促進區域永續發展的策略，並指出山區和部分高原是避開極端高溫的最佳地區。同樣的，張宸瑄 (2024)針對桃園市之研究中觀察到，其指出高熱調適能力區域主要集中於森林覆蓋率高之大溪與復興，農業地景如觀音、新屋與楊梅亦具次高調節能力。然而，2007 至 2021 年間整體 HMI 值呈現下降趨勢，反映降溫功能正逐漸弱化，且與溫室效應造成地表溫度差持續擴大密切相關。此外，Jame et al. (2024)探討了法國普瓦捷市的城市熱島效應 (UHI)，結合衛星影像及熱緩解指數 (HMI) 進行分析，並比較了 1993 年與 2020 年的城市景觀熱區與冷區的時空演變。研究結果顯示 1993 年至 2020 年間城市熱區有顯著擴展，尤其是在城市郊區的大型人工區域。也表明植被 (如樹木和草坪) 對於降低城市熱島效應至關重要，並證實了植被覆蓋率的增加與 HMI 值的提升有關。提出基於自然的解決方案 (如增加植被和使用環保建築材料) 以減緩城市熱島效應，並強調高精度土地覆蓋圖的重要性。

此結果與臺中市都市核心區熱調適能力長期偏低的觀察相互呼應，凸顯在氣候變遷與都市擴張雙重壓力下，自然地景的保存與都市綠地結構的優化對於強化區域熱環境調節功能，已成為維持人居健康與提升城市韌性之關鍵。

### 5.1.7 生態系服務熱點

綜合熱點區於三個觀測年份中，皆主要集中於臺中市東部地區，涵蓋林地與草地等自然生態系。相對而言，水體、建地、稻作地與旱作地等受人為活動高度影響之區域，則多位於生態系服務綜合熱點較低的區段。由各年各行政區生態系服務數值圖來看，三個年份中，和平區之生態系服務功能始終顯著優於其他行政區。由於和平區其行政轄區面積廣大，土地利用類型以林地為主，具備高森林覆蓋率、年均降雨量豐沛，且地形條件有利於集水與涵養水源。加以該區植被保存良好，且人為干擾相對有限，促使其在多項生態系服務指標上皆表現卓越，包括碳儲存、氮磷營

養鹽留存效能、熱調節能力以及穩定之產水功能。整體而言，因和平區具備良好之自然條件與生態結構，所以為臺中市生態系服務價值最高之地區。此結果與周品樺 (2024)、張宸瑄 (2024) 及國外文獻之研究相符，皆指出自然地景在生態系服務供給上的優勢表現。前者將六種生態系服務進行疊加，並將同時具有四種(含)以上熱點區域定義為生態系服務綜合熱點，結果表示，陳有蘭溪流域內有 14%的土地為生態系服務綜合熱點，其中土地利用類型以林地站 94%為主，其次為草地(3%)及荒地(2%)，後者發現桃園市 2007 年及 2021 年具有四種(含)以上熱點區域佔整體 23.5%、22.34%，2014 年相比之下之熱點占比偏低，僅占整體的 6.44%，因降雨量低導致產水量、沉積物留存及氮、磷營養鹽留存降低，熱點占比偏低。此外，Orsi, Ciolli, Primmer, Varumo, and Geneletti (2020) 研究探討歐盟森林生態系統服務 (FES) 的供給，透過繪製地圖識別熱點區域，分析不同服務間的協同效應與權衡，並劃分服務組合。研究也指出，森林之所以成為生態系服務熱點，主要來自其多功能性與高服務疊加效益。森林可同時提供木材、供水、侵蝕控制、氣候調節、棲息地保護等多項關鍵服務，且這些服務在空間上高度重疊，形成顯著的協同作用。特別是在地形起伏大、氣候穩定的山區，森林更展現出優異的調節與支持功能。歐盟的研究也發現，中歐與山區森林區域常被辨識為多項服務的「服務捆綁」區，強化了其作為熱點的地位。Bai, Ochuodho, Yang, and Agyeman (2021) 針對肯塔基州的研究分析了多項生態系服務熱點與服務捆綁的空間分佈特徵，並探討其協同與權衡關係。研究涵蓋全州 120 個縣，評估了七項主要生態系服務，包括產水量、沉積物輸送比、養分輸送比、木材生產與碳儲存等。根據景觀特徵與服務功能。結果顯示，除供水服務外，其餘六項生態系服務的熱點均高度集中於森林景觀中，尤以木材生產、氮與磷的養分留存服務最為明顯。這些服務在空間上表現出明顯的地理聚集性，反映森林地區具備多項生態功能的整合潛力，也凸顯森林對維持區域生態平衡的重要角色。

而 2007 年及 2014 年其次高值為北屯區、潭子區、豐原區等行政區的組成則是以作物生產及氮、磷營養鹽留存為主，這些行政區為稻米及梨的生產區，此外其自然條件亦有利於營養鹽的固定與滯留。地理上，三區多處位於臺中市中北部的丘陵與山地交界處，地形起伏顯著、地勢相對較高，有利於水土保持與減緩逕流速度，

進而促進氮磷的滲透與吸附。儘管部分區域經歷都市化發展，整體仍保有廣泛的綠地、果園及山坡地農業，尤其如潭子與豐原北側，以及北屯區的大坑風景區與頭嵙山周邊，皆擁有良好的植被覆蓋與次生林分佈，進一步強化土壤涵養與養分留存功能。與市中心高密度開發區域相比，這些地區的土地利用壓力較低，污染源相對有限，加上降雨量分佈適中，既無過度集中的極端降水，也較少快速逕流現象，使營養鹽得以被有效留存而非迅速流失，有助於維持較佳的氮、磷留存效益。2021 年多數行政區的生態系服務組成與 2007 年及 2014 年相比出現明顯變化，主要受降雨分佈改變影響。該年降雨量由山區轉向西移至都市區，導致產水量顯著提升；相對地，氮與磷營養鹽在西部行政區的留存量則因降雨沖刷而較前兩年下降。其他生態系服務則維持相對穩定，未出現顯著波動。

### 5.1.8 生態系服務權衡關係

各項生態系服務間的協同或競合關係，與土地利用型態、氣候條件變化及人為干擾程度密切相關(Tang et al., 2020; Vallet et al., 2018)。碳儲存與氮磷營養鹽留存、沉積物留存及都市降溫生態系統服務之間呈現明顯協同關係，而作物生產與產水量呈現一定程度之競合關係或無相關。

碳儲存、氮磷營養鹽留存、沉積物留存及都市降溫等生態系統服務之間呈現明顯協同關係，反映出多項生態功能於空間尺度上具高度耦合性。首先，碳儲存潛力高的地區多具有良好植被覆蓋，特別是森林、灌叢與濕地等自然地景，不僅能有效固定大氣中之二氧化碳，亦可提升土壤結構穩定性與涵養力，進而促進氮與磷營養鹽於土壤中的吸附與留存，減少其因逕流造成的流失與污染風險。其次，這些高碳儲存地區之地表植生亦有助於減緩地表逕流速率、穩定坡地與減少土壤侵蝕，使沉積物流出顯著降低，提升整體沉積物留存效能。再者，高度植被覆蓋地區因具備良好的遮蔭效應與高蒸散能力，可有效調節地表溫度，並降低都市熱島效應，強化區域的都市降溫功能。氮與磷營養鹽的留存協同關係最高，因為養者在空間上表現出高度一致，主要因兩者對地形、坡度與降雨等自然條件的反應類似，而林地因其良好植被覆蓋與高有機質土壤，能有效減緩逕流與侵蝕，是促進營養鹽留存的主要區域(Vallet et al., 2018)。作物生產與產水量、碳儲存、氮與磷營養鹽留存、沉積物留存及都市降溫等生態系統服務呈現一定程度之競合關係，顯示即便農業區長期維

持耕作用途，農業活動本身亦可能對其他生態功能造成壓力。首先，集約化農業為提高單位面積產量，常大量施用化肥與農藥，若管理不當，易造成氮、磷營養鹽的流失與外輸，削弱其於土壤與流域內的留存功能，並導致水體富營養化風險升高。其次，農地耕作涉及定期翻耕與排水操作，使地表結構鬆動，降低土壤穩定性與對沉積物的自然攔截能力。再者，大面積農地缺乏高植被覆蓋，碳儲存效能相較於森林或天然植被顯著較低，亦不利於長期碳儲存。此外，農地地表蒸散作用與遮蔭效果有限，難以發揮顯著的都市降溫功能，在高溫期間甚至可能增強區域熱通量與熱島效應。總體而言，農業區雖為作物生產之核心空間，惟其在高投入型經營模式下，與部分關鍵生態系統服務仍存在潛在負向關聯，顯示永續農業實踐與生態整合策略亟需強化，以實現多元系統功能之協調。產水量則與降雨分布息息相關，會受到該年降雨分布及降雨量的影響，使其與其他生態系服務產生無相關或是競合關係。

此結果與張宸瑄 (2024)之結果相符，該研究指出三年間的作物生產與其他生態系服務為競合關係，而碳儲存、沉積物留存及氮、磷營養鹽留存 2007 年 2014 與 2021 年均呈現不同程度之協同關係。除 2014 年降雨量與其他年份分布不同導致該年產水量與所有生態系服務呈競合關係，該現象亦與周品樺 (2024)之研究結果一致，當降雨量少時，生態系服務間更易呈現無顯著相關或競合關係。綜合比較三年度之結果可見，氮與磷營養鹽留存間之相關性最為穩定且高度一致，而產水量在 2014 與 2021 年間與氮、磷營養鹽留存則多呈現弱相關或競合關係。

同時，Vallet et al. (2018)探討不同方法評估生態系服務之間關係的敏感度及其應用，特別是在哥斯達黎加雷文塔松流域案例中，研究比較了空間相關性與時間序列相關性對不同服務間關聯的解析能力。空間上，服務水準往往取決於相同的潛在因素，特別是土地利用與覆蓋型態。例如，在使用 InVEST 模型時，碳儲存與農業生產之間常出現競合，主因是兩者在高產農地與森林中的潛在值設定具對立性；農地碳儲存量低、農業產量高，而森林則相反。相對地，氮與磷留存則因共享相似的土地利用條件而表現出穩定協同。另一方面，時間相關性分析則揭示生態系服務關係會隨土地利用變遷而動態轉變。由於碳儲存主要來自森林覆蓋，而農業生產則來自耕地，兩者於時間尺度上呈現此消彼長的變化趨勢。此外，有些服務關係在時

間序列下表現為正相關（如農業生產與泥沙保留），卻在空間上不具顯著關聯，顯示不同方法可能受到驅動因子的差異（如氣候、水文連結性、海拔等）所影響。

綜上所述，透過 Pearson 相關係數深入揭示臺中市生態系服務間的互動關係，發現多數服務間存在穩定且逐年增強的協同趨勢，特別是氮與磷營養鹽留存表現出高度一致的正向關聯性。惟在降雨異常年份，如 2021 年產水量與多數生態系服務的關聯性轉為競合或協同關係變弱，提醒我們氣候變異對生態系整體功能具有顯著影響。此結果不僅呼應過往研究，也凸顯強化水資源管理與提升生態系韌性的 importance。



## 5.2 WEF Nexus 永續性指標

### 5.2.1 水子系統

城市化和人口密集的地區(台中都市圈)的水資源永續性低於山區(和平區)。由於臺中市西部地區在都市發展與農業需求的雙重影響下，水資源壓力持續升高。西屯、南屯、北屯等區迅速發展，人口密度高，住宅、商業及公共設施的用水需求不斷攀升，使人均用水量上升，進一步加劇水資源消耗壓力。同時，該區域亦為臺中主要農業生產基地之一，農業類型以水稻與蔬菜等高耗水作物為主，與東部果樹農業相比，灌溉需求更為龐大。部分農田仍採用傳統的溝灌等方式，水資源利用效率較低，加重水資源消耗問題。此外，隨著都市與工業活動的擴張，區域內水資源開發利用率雖提升，但亦伴隨而來的水質污染問題亦不可忽視。若廢(污)水處理設施不足，工業區大量排放的污水將對水體品質造成衝擊，進而影響整體水資源永續性。Y. Ding and Peng (2018); Heidari, Arabi, Warziniack, and Sharvelle (2021); C. Wu, Liu, and Deng (2023)研究也發現由於用水需求增加、自然水保有量減少以及污染加劇等因素，城市化和人口稠密地區的水資源永續性通常低於山區。由於人口密集、工業活動頻繁以及各種人類用途，城市地區的用水量龐大。這種需求的成長往往超出了當地水資源的承載能力，導致水資源短缺。

相較之下，和平區人口密度較低，人均水資源量遠高於都市地區，從而減輕區域內供需壓力。產業結構方面，和平區以觀光及農林業為主，工業發展程度較低，僅有少數工廠運作，因此工業用水需求較小，避免了大量水資源消耗與廢(污)水排放。農業部分則以果樹栽培(如水蜜桃、梨子等)為主，相較於水稻等高耗水作物，灌溉需求較低，有助於水資源永續利用。Y. Ding and Peng (2018); Thornton et al. (2022); Xu et al. (2025) 也發現山區通常降水量較高，這些降水被儲存在積雪、冰川、湖泊和蓄水層中。這種天然的儲存系統緩慢而穩定地釋放水分，在乾旱時期起到天然的緩衝作用。通常有大面積的森林和植被覆蓋，在調節水流、減少侵蝕和改善水質方面發揮著至關重要的作用。人口密度較低，工業活動較少，因此與城市中心相比，對水的需求較低。

整體而言，本研究觀察所得結果也與張宸瑄 (2024) 研究相符，均指出自然條件與人為活動交織下，空間上的資源分佈與利用效率對水資源永續性形成決定性

影響。此外, Yikun Zhang and Wang (2024) 對黃河流域進行的相關研究亦提供佐證, 該研究建立了一個「人類活動-土地利用-WEF 關係」的理論框架, 指出水子系統在空間上呈現南方永續性較高、北方較低之趨勢, 其中, 青海、四川與河南三省的水資源子系統相對較高, 而寧夏則表現最為低落。此一差異主要可歸因於水資源本身的自然分佈差異, 如青海與四川擁有豐沛水源, 而寧夏相對乾旱, 以及各地區水資源利用效率與管理能力的差異, 如河南透過改善用水效率與強化資源配置而提升整體得分。此一結果與本研究對臺中市空間異質性的觀察方向一致, 顯示自然與人文因素交互影響下, 水資源永續性之地區差異性極為顯著。

### 5.2.2 能源子系統

在本研究中所採用的能源子系統指標, 如電氣化程度與科研投資佔 GDP 比例, 雖原本旨在評估能源轉換效率與區域技術研發能力, 然實際在本研究中所計算的能源與電力消耗量主要反映的是各行政區的能源使用需求, 而非實際進行能源轉換的場所。由於臺灣電網系統供應複雜, 使得難以從供給端準確計算, 進而導致該指標與永續性評估初衷產生偏差; 而科研投資比例也高度依賴該區是否設有工業單位, 當工業活動密度較低時, 即便有農業或自然資源優勢, 其在該指標下的表現亦可能偏弱。

綜合考察臺中市主要工業區之地理分佈, 發現能源永續性空間格局與產業佈局具有高度相關性。如大雅、潭子、西屯與后里等具備成熟產業基礎設施與較高科技研發投入的地區, 即便人均能源消耗與碳排放偏高, 仍可因良好的能源效率與廢棄物管理系統而展現較佳的永續性指標。相對地, 東部如和平、新社與東勢等非工業型地區, 由於基礎設施不足、人口稀疏且產業以農業與觀光為主, 能源系統依賴度低, 然後科技投資與電氣化水準較低, 導致在能源永續性表現上不具優勢。此外, 2021 年部分區域指標回落的現象, 可能反映產業轉型中所面臨的能源結構調整壓力, 亦可能因 COVID-19 疫情期間能源使用型態的異動及政策執行效果的不一致性, 致使整體能源系統效率未如預期提升。

根據 Opoku, Acheampong, and Aluko (2024)的研究整理出都市能源永續性較高, 主要是由於城市地區的基礎設施與經濟資源較為完善, 使得能源供應和使用更加

高效與清潔。城市擁有更完善的道路、電力、清潔烹飪技術和燃料等基礎設施，這不僅提升了能源使用的可持續性，也降低了對環境資源的過度依賴(Acemoglu, Johnson, Robinson, & Thaicharoen, 2003)。此外，城市的經濟結構和治理體系更能有效支持現代能源系統的發展，這有助於提高能源使用效率，減少環境退化的風險(Acemoglu et al., 2003; Best & Burke, 2017)。在環境監管方面，城市擁有更嚴格的政策與執行力，從而能有效控制能源消耗對環境的負面影響(Kammerlander & Schulze, 2021)。相比之下，鄉村能源永續性較低，主要是由於農村地區基礎設施的缺乏和經濟資源的不足。農村居民往往依賴傳統的能源來源，如木柴和木炭，這些能源方式對環境造成較大壓力，並且無法提供足夠的能效和永續性(Babulo et al., 2009; Beck & Nesmith, 2001)。此外，農村地區缺乏足夠的現代能源設施，且治理結構薄弱，這使得農村電氣化計劃無法有效推進，限制了農村居民對現代清潔能源的獲取(Acheampong, Nghiem, Dzator, & Rajaguru, 2023)。因此，鄉村對環境資源的過度依賴，尤其是森林資源的採伐，已成為導致環境惡化的重要因素(Acheampong & Opoku, 2023)。總結為都市與鄉村在能源永續性上的差異，反映出基礎設施分佈、治理品質及經濟發展等因素對能源系統永續性的深刻影響。本研究實證結果亦顯示，工業區等城市化地區的能源永續性明顯高於山區、沿海等農村地區，進一步證實基礎設施、治理品質與經濟條件是影響能源永續性的重要因素。

由此可見，臺中市能源子系統之空間差異，並非僅由能源消費量或產業類型所單獨決定，而是產業地理分佈與能源永續性之間互動關係的體現，反映出政策支持、科技研發投入、產業密度與區域發展條件等多重因素的綜合影響。

### 5.2.3 糧食子系統

糧食永續性指標的本質不僅是耕地面積或農業類型本身，而是整體土地利用條件、人口密度、資源配置效率與生產方式等的綜合反映。在糧食永續性表現上，山區型農業地區(旱作地)如和平、新社、東勢等地，普遍展現出相對較高的糧食子系統永續性，主要是受惠於該類地區擁有較低的人口密度與相對完整的農業空間，土地開發壓力有限，有助於維持較高的人均耕地面積與耕地占比，進而提升單位面積糧食產出與人均糧食生產指標。此外，由於開發程度低及土地面積廣大，因此化肥與農藥使用相對量少，亦使化肥負荷得以維持在較低水準，整體環境承載力因而

相對穩定。相較之下，雖然如后里、外埔、豐原等地區亦屬旱作與稻作型農業區，理應具備良好農業基礎，惟其永續性指標卻相對偏低。此一差異可能源自該等地區多位於臺中市核心都市圈之邊陲，長期面臨都市擴張與人口集聚所帶來的土地競爭壓力，導致農地面積被壓縮，人均可耕作面積與耕地比重下降，化肥使用負荷高；再者，人口相對集中也可能提升生活與農業總需求，更易形成永續性指標表現不佳之結果。整體而言，地形條件、人口密度、土地利用競合與農業生產效率的複合交互作用，構成糧食永續性表現之關鍵決定因素。

張宸瑄 (2024) 之研究亦呈現與本研究相似之區域分佈特徵，其指出新屋、觀音與楊梅等屬農業主導區域，因糧食生產量高與農業種植面積較大，導致此區域永續性指標表現好。此外，復興區由於人口數遠低於其他行政區，使得相關指標在以人口基數標準化後，仍呈現相對較高的永續性表現。此外，Yikun Zhang and Wang (2024) 針對黃河流域的研究亦指出，該流域九個省區的糧食子系統得分整體呈現穩定上升的趨勢，尤以寧夏、內蒙古、四川、河南與山東五省區的糧食子系統表現最為突出，這些地區皆屬中國重要的糧食主產區，具有良好的耕地資源基礎、完善的農業設施與高度的糧食產能，因而在糧食永續性評估中具有明顯優勢。雖然研究區位與指標設計略有不同，整體結果仍呼應糧食主產區通常擁有較高糧食永續性之趨勢，但因各研究對於永續性衡量指標選取不同，亦可能導致區域間評估結果有所差異。

#### 5.2.4 WEF Nexus 永續性指標權衡關係

研究結果顯示，三個年份間的水子系統與糧食子系統均呈現高度顯著協同關係，而水子系統與能源子系統則均為弱競合關係，能源子系統與糧食子系統則由無關係轉為弱競合關係。本研究結果與張宸瑄 (2024) 所提出之研究結果呈現明顯差異。該研究指出，桃園市的糧食子系統與能源子系統之間的關係由無相關轉變為競合關係；此外，糧食子系統與水子系統在三個年份中均呈現競合關係，而能源子系統與水子系統則始終維持協調關係。然而，後兩者與本研究所得結果顯示出相反趨勢。而在 C. Sun and Hao (2022) 研究中針對中國 30 個省區的 WEF 系統演化分析顯示，發現資源配置的空間不均與產業發展結構差異，是造成子系統之間協同或競爭的關鍵因素。研究結果指出，在水與能源的關係中，僅 3 省呈協同、15 省為競



合；水與糧食系統間則以限制關係為主（23省），僅少數呈協同，顯示兩系統存在潛在競合；能源與糧食系統在西北與西南地區表現出明顯競爭與限制反映地形條件與基礎設施不足影響兩系統協同。

本研究中水資源與能源子系統永續性指標在行政區尺度上呈現顯著負相關顯示兩者在空間資源分布與發展模式上可能存在潛在的競合關係。此一現象可歸因於以下數項因素。首先，兩個永續性指標體系所關注的核心目標具有本質上的差異，可能出現衝突。水子系統永續性強調人均水資源、水資源利用效率與污水處理與排放控制等環境導向指標；相對地，能源永續性則聚焦於能源使用效率（例如能源密集度與碳強度）與產業系統運作效能（如工業固體廢棄物處理效率與電氣化程度）等經濟結構性指標。當區域為提升能源永續性而推動都市化與工業升級時，通常伴隨用水需求顯著提升與污染風險增加，進而不利於水子系統永續性表現。其次，臺中市西部后里區、大雅區與潭子區為高能源密集度與科技產業聚集之地，其能源系統運作效率與電氣化水平相對較高，因而能源永續性表現優異。然而，此類區域亦因高人口密度與產業用水強度，承受顯著水資源壓力，並面臨較高之污水排放風險使水子系統永續性指標偏低。相對地，表現出良好水子系統永續性的地區（如和平區與新社區）多位於水源涵養區與低開發程度之山區，具備豐富水資源與優良的自然涵養條件，但受限於基礎設施與產業發展程度，導致能源利用效率與科技投資水準相對較低，使能源永續性指標偏低。與此形成對比的是，張宸瑄（2024）研究中桃園市的水資源與能源子系統呈現穩定的協同關係，歷年皆未觀察到顯著的權衡或負相關情形。儘管桃園能源高度仰賴進口（超過99%），但石門水庫所貢獻的水力發電量高，佔全國水力電能的35%，有效結合水與能源資源。此外，桃園市工業單位GDP的能耗低、人均能源供應充足，再加上地方具有推展再生能源（如埤塘設置浮動太陽能板）的潛力，使其能源系統發展得以與水資源利用協調並進，實現良好的水資源與能源子系統永續性。綜上，臺中市受限於都市化與產業活動所帶來的用水壓力與環境衝擊，導致水與能源系統之間出現明顯競合；而桃園市則因水力發電優勢、工業效率與再生能源潛力，展現出協同穩定的水資源與能源發展關係。

C. Sun and Hao (2022) 中國有15個省份的水與能源子系統呈競爭關係，主要集中於南方地區。雖然水資源較充沛，但未轉化為優勢，加上能源結構仍以化石燃料為主，

且經濟規模龐大、能源消耗高，導致水資源與環境壓力上升，形成資源競合。另有 13 個省份處於限制狀態，集中於黃河流域。該區為中國主要化石能源產地，但水資源僅占全國 3%。在山西、陝西、內蒙古等地，能源產業高度耗水，加劇了水與能源系統之間的競合與約束。與本研究的結果皆顯示，水資源與能源子系統之間普遍存在競合關係，主因在於兩者資源分布與發展目標差異明顯。能源系統多集中於都市與工業區，具備高能源效率與基礎設施，但也伴隨高用水需求與污染風險，對水資源造成壓力；而水資源豐富區如山區則因產業基礎薄弱，能源永續性相對不足。中國與臺中的案例皆突顯，當區域同時追求能源發展與經濟成長時，若未妥善考量水資源承載力，將導致系統間的資源競合與協調困難。

此外，本研究亦發現水資源與糧食子系統永續性指標在行政區尺度上呈現正相關，顯示水資源狀況與農業永續發展間具高度協同關係。糧食永續性包涵人均耕地面積、單位面積農作產出與化肥使用負荷等指標，其中穩定且充足之水資源供應為提升農業生產效率與保障糧食安全之基礎。臺中市主要農業分布於中部盆地與東部丘陵地區（如后里區、東勢區、新社區與和平區），此類區域除具備良好耕地資源與農業條件外，亦鄰近水源涵養區或主要河川流域，具產水能力與灌溉優勢促進水與糧食系統之永續表現。此外，水與糧食系統空間分布多與非都市化地區高度重疊，相對於都市核心區域，郊區與山坡地區展現出更佳的自然涵養功能與土地資源整合潛力，形成資源耦合與機能互補之特性，進一步強化兩系統間之正向關聯。相較之下，張宸瑄 (2024)的研究中，桃園市的研究則指出水資源與糧食子系統子系統存在顯著的競合關係。此一差異主要源自桃園特殊的地形與土地利用壓力。桃園多為台地與丘陵地形，水資源難以有效滯留與利用，加上耕地面積逐年縮減（從 2007 年 28% 降至 2021 年 25%），土地資源緊張，導致水資源難以充分支援農業系統發展。此外，都市擴張對耕地與灌溉系統也構成壓力，進一步加劇水資源與糧食子系統系統的權衡關係。C. Sun and Hao (2022) 發現在水與糧食子系統關係中，共有 5 個省份表現為協同狀態，主要為北京與天津等糧食依賴輸入的地區。該類地區因耕地面積有限、糧食自產量低，加上政策推動「科技儲糧」與精準農業，成功降低水資源壓力，實現系統協調發展。然而，23 個省份處於限制狀態，廣泛分佈於東北、西北、華北與東南沿海。中國農業生產長期仰賴大量水資源投入，灌溉效



率偏低，農地多集中於水資源匱乏的北方，導致糧食生產高度依賴區域水源。在耕地退化、水污染與資源技術限制等因素下，進一步加劇了水與糧食子系統的競合關係。

最後，能源與糧食子系統永續性之間則呈現無相關轉至競合關係，顯示兩者在空間配置與資源需求面向上存在潛在衝突。能源永續性偏重於都市與產業區的能源效率與科技基礎建設，其表現佳者多為高都市化、高科技密度之區域。惟此類區域農業生產空間受限，糧食生產條件不利，因而糧食永續性估分偏低。反之，糧食永續性佳之區域多為農業活動集中地，如郊區與丘陵農業帶，該區域擁有廣大農地與較高糧食自給能力，然由於產業結構較單一，能源基礎建設與電氣化比例偏低，導致能源永續性不彰。此外，若農業區域未能有效推動節能與減碳措施，仍倚賴傳統高耗能方式（如化肥依賴與機械密集），亦可能拉高能源密集度與碳排放水平，進而對能源永續性構成負面影響。本研究觀察與 C. Sun and Hao (2022) 分析結果相似，在能源與糧食子系統的互動中，共有 6 個省區呈現協同關係，主要集中於華北與華南地區（如河北、河南、江蘇、廣東等）。這些地區糧食產能穩定，能滿足基本消費需求，同時為能源系統提供物質基礎；而能源子系統的發展亦促進了工業化與基礎設施建設，反哺糧食生產，形成雙向正向循環。相較之下，有 14 個省區處於限制關係，主要分布於西北與西南地區。儘管西北地區富含化石能源，西南地區具備水力發電潛能，但兩地普遍面臨耕地品質差、水資源不足及地形複雜（如喀斯特地形）等問題，使得糧食系統無法有效發展，進而約制兩系統的協同效益。研究與文獻結果皆指出，能源與糧食系統間的協同與否，深受地區自然條件與產業結構所影響。未來應依地制宜調整資源配置與產業策略，以促進系統整合與永續發展。

## 5.3 生態系服務與 WEF Nexus 永續性之間的關係評估

### 5.3.1 生態系服務與 WEF Nexus 永續性之間的耦合協調度

臺中市產水量與 WEF Nexus 永續性之協調度在各年度間的空間分佈趨勢，普遍與同期降雨量及產水量之結果相互呼應，兩者具有高度相關性。此觀察結果與 T. Ding et al. (2023)及張宸瑄 (2024)之研究所指出結果一致，認為降雨之空間異質性將直接影響產水量的地理分佈，也進而對水子系統之永續性造成影響，導致產水量與 WEF Nexus 永續性之協調度收到一定程度之影響。

由於各行政區生態背景條件存在差異，鏈結永續性與各項生態系服務的協調性存在明顯的空間異質性。例如，長三角南部的杭州良好的生態條件與政策支持使其在碳儲存及沉積物留存與鏈結永續性協調性方面表現優異，相對地，上海等長三角中北部城市因植被覆蓋度低、生態系服務能力弱，導致協調性發展受限(T. Ding et al., 2023)。本研究結果亦顯示，臺中市和平區等山區因具豐富森林覆蓋與穩定的自然資源循環體系，其碳儲存與 WEF Nexus 永續性協調度長期維持高度協調狀態；反之，西部都市區域則普遍呈現不協調現象。然而，值得注意的是，在沉積物留存與 WEF Nexus 永續性之協調度方面，本研究觀察到三個年份中各行政區皆顯現極度不協調，整體不協調程度甚至高於長三角地區，進一步分析造成沉積物留存與 WEF Nexus 永續性協調度普遍偏低之原因，發現在進行沉積物留存指標標準化處理時，研究區域內存在少數極端高值，導致標準化後大多數行政區之相對值顯著偏低。由於協調度係基於兩變數之值進行耦合分析，沉積物留存指標值在此情況下趨近於零，進而導致整體協調度評估結果普遍落於 0 – 0.2 的極度不協調區間。此現象顯示在進行空間尺度比較時，極端值對指標標準化結果具有顯著影響，可能造成對實際空間分佈與功能貢獻的低估，值得於後續評估模型中納入更合宜的標準化方法進行調整與修正。

臺中市西部主要作物生產區域普遍呈現與 WEF Nexus 永續性呈現協調狀態，相較之下，東勢、新社及和平區雖局部地區具備旱作農業活動，惟因其作物產量未達 InVEST 模型 Crop Production 模組所定義之產量熱區標準，導致在耦合協調度分析中呈現不協調狀態，此結果與 T. Ding et al. (2023)及張宸瑄 (2024)之研究結果相似。

氮、磷營養鹽留存與 WEF Nexus 永續性之協調度整體趨勢相似，僅於中區、南區、東區及北屯區呈現輕度不協調，其餘多數行政區則維持協調狀態。相較之下，都市降溫與 WEF Nexus 永續性之協調度在都市核心區域顯示中度不協調，而周邊地區則多為輕度不協調，唯獨山區行政區整體呈現高度協調，反映出其良好的生態調節功能。此結果與張宸瑄 (2024)之研究結果一致，指出都市區域因高密度建成環境與較弱的生態調節能力，導致在部分生態系服務與永續性之間出現不協調的現象。

臺中市各項生態系服務與 WEF Nexus 永續性之協調程度具有明顯的時空差異與空間異質性，其背後主要受到降雨分佈、土地利用型態、生態背景條件以及模型指標標準化方法等多重因素影響，各項耦合協調度結果幾乎與該項生態系服務熱點分佈相似。山區地區因具備良好生態基礎與資源涵養能力，普遍於碳儲存、氮磷留存與都市降溫等服務中表現出高度協調；反觀都市化程度較高之區域，則因生態功能相對低落而多呈不協調現象。需注意的是，指標極值對協調度分析結果之潛在扭曲效應亦顯著，建議後續研究於模型設定與標準化程序中引入更具彈性與代表性的處理方式，以提升評估結果之準確性與政策應用價值。

### 5.3.2 生態系服務與 WEF Nexus 永續性指標權衡關係

本研究結果顯示，作物生產與水子系統永續性指標在多數年份呈現顯著弱競合關係，與 Ding et al. (2023)及張宸瑄 (2024)之研究結果亦相吻合，即作物生產強度愈高之區域，其水資源永續性表現愈差。進一步分析發現此現象可歸因於水子系統永續性指標所涵蓋之構面，包括人均水資源量、人均用水量、單位 GDP 用水量、工業額外產值用水量、水資源利用率與廢（污）水量等項目。農業，特別是水稻種植，高度依賴灌溉水源，使農業密集區之總用水量與人均用水量顯著提升，進而拉低指標評分。此外，農業施肥與農藥使用亦可能導致氮磷流失，造成水體污染與污水排放增加，間接影響指標表現。空間上，臺中市大甲溪流域與西部平原為主要農業生產區，亦為水資源永續性評分偏低之區域，突顯農業活動對水資源系統所施加之壓力。整體而言，作物生產與水子系統永續性之競合關係，反映出農業用水效率與水資源管理間之結構性矛盾。未來應透過推動節水灌溉技術、強化用水監測機制與發展水資源循環利用體系，以促進糧食安全與水資源永續之協調發展。

研究亦發現，水子系統永續性指標與產水量、碳儲存、氮留存、磷留存、沉積物留存及都市降溫等六項生態系服務整體呈現協同關係，顯示自然涵養與環境功能良好的區域，更有助於支撐穩定且永續之水資源利用。此關係之形成機制可歸納如下：首先，產水量與水永續性指標間關聯最為直接。涵養林地與森林覆蓋率高的區域通常具備良好的土壤滲透性與地下水補注功能，可提升總水資源供給與人均水資源量，同時因人為開發程度低，總用水需求相對較小，有助於降低水資源壓力。其次，碳儲存與氮、磷營養鹽留存與水質維護密切相關。高碳儲量區多分布於森林與濕地等自然地景，其高度的營養鹽吸附與攔截能力有助於減少水體污染，對廢（污）水量之控制具正面效益，從而提升水永續性指標表現。沉積物留存能力亦為關鍵角色，土壤穩定性高之區域可有效降低水體混濁與淤積風險，對下游水庫與河川系統具保護作用。此類地區亦常為自然地貌保存良好處，水循環功能健全，對水資源永續具促進作用。此外，都市降溫效應亦顯示城市綠地與透水性地表的貢獻，這些環境配置有助於都市微氣候調節與水分蒸散循環，有助於都市地區用水需求降低與灌溉效率提升，在整體水系統中形成正向貢獻。總體而言，這些呈現正相關的生態系服務，多數集中於自然涵養能力強、土地開發強度低、具多功能生態價值之區域，說明自然生態結構的完整性，對支撐區域水資源永續管理具有正向影響。亦反映生態系服務良好供給可與人類用水需求達成協調，為永續發展提供生態基礎。值得注意的是，2007 至 2014 年間，水子系統永續性與產水量呈顯著協同關係，但隨著降雨空間變化，2021 年高產水量之區域移至中區、東區及太平區，反觀水子系統永續性則因和平區人口及工業密度低，其永續性指標仍顯著高於其他行政區，導致兩者在該年度間失去統計上的相關性。由於氣候條件改變而由顯著協同關係變為無相關與 Ding et al. (2023) 及 張宸瑄 (2024) 所觀察之結果相符。

另一方面，能源子系統永續性指標與產水量、碳儲存、氮與磷營養鹽留存、沉積物留存及都市降溫等多項生態系服務整體呈現競合關係，顯示能源表現之區域往往不具備良好的生態涵養能力，兩者也在空間分布上呈現明顯落差。能源永續性指標涵蓋人均能源消耗、能源密集度、碳強度、工業固體廢棄物處理率、電氣化比例及科技研發支出占 GDP 比重等面向。整體而言，指標表現優異區域多為臺中市中西部之工業與科技發展集中區，具備完善能源基礎設施、高能源效率與電氣化程

度，惟同時亦伴隨高人口密度與建成環境，導致自然地景比例偏低，限制生態系服務供給潛力。例如，高度都市化地區森林與農地面積有限，碳儲存能力低下；鋪面率高使水分入滲與涵養功能受限，亦不利產水量的表現；土地開發與地表逕流加劇亦抑制營養鹽與沉積物留存效益。儘管都市區具備較高能源效率，綠地與林地面積稀少，都市降溫效益仍顯不足，在 Yuan and Lo (2020) 及 Ding et al. (2023) 的研究中也發現此情形。而根據 van den Heuvel et al. (2020) 研究指出，人類能源開發活動可能對生物地球化學循環與土地物理條件造成干擾，進而對生態系服務施加壓力。例如，建設再生能源基礎設施往往導致土地利用類型轉變，影響農業生產潛力；而生質能源作物的大規模種植亦可能改變土壤結構，降低碳儲存能力，對碳循環與氣候調節等關，功能造成潛在威脅。而本研究區域內之能源開發與人為活動區域內尚未對生態環境造成重大破壞，及其影響分佈相對均勻，致使能源子系統永續性與多數生態系服務間缺乏顯著關聯。反觀如和平區與東勢區等生態系服務表現良好之山區，具有高森林覆蓋率與低開發強度，展現良好之涵養與調節能力，惟多屬偏遠地區，能源基礎建設與再生能源應用相對不足，導致能源永續性評分偏低。此結果反映臺中市能源效率提升與生態功能保育間尚存潛在權衡，未來應透過整合性空間規劃策略，協調能源基礎設施與生態服務空間配置，尋求生態保育與低碳發展之共融方案。

能源子系統永續性指標與作物生產呈正相關，此趨勢與其他生態系服務多數呈負相關之結果相異。此現象可能顯示臺中市部分農業區在農業發展過程中，已成功結合能源效率與生產效能，展現潛在正向聯動關係。具體而言，農業區可能逐步導入高效節能設備與智慧農業技術，如高效率灌溉系統、太陽能溫室及農業感測器系統，促進能源密集度與碳強度等指標改善。此外，這些農業區多屬低至中度都市化區，雖人口密度不高，但在電氣化比例、固體廢棄物處理率與研發支出占比等面向仍具一定水準，使能源子系統永續性維持中高表現。

最後，糧食子系統永續性與作物生產呈競合關係，顯示在臺中市區域尺度下，作物生產量高的區域並不一定具備較佳的糧食永續性表現。此結果與 Ding et al. (2023) 及張宸瑄 (2024) 之研究結果有著不一致，兩者之糧食子系統永續性與糧食產量之間存在顯著的協同關係，原因為糧食子系統永續性對作物生產具有正向影響，

桃園市在正向永續性指標的影響下使兩者間產生協同關係。而進一步分析原因本研究中糧食永續性指標涵蓋人均種植面積、耕地範圍、人均糧食產量、單位面積產出、化肥使用負荷與農業生產比值等構面。高產區（如臺中市西部）多伴隨高密度耕作與大量化肥施用，導致「化肥負荷」表現不佳。此外，人口密集導致人均耕地面積與人均糧食產量偏低，亦拉低整體永續性評分。相對地，農業密度較低之地區（如東勢、新社）因人均耕地面積大、投入密度低，反而在相關指標上表現較優。過高之單位面積產出亦可能表表土地高強度利用，隱含資源透支風險。綜合而言，糧食永續性評估強調資源使用效率與環境負荷平衡，高產並非唯一指標。

另一方面，糧食子系統永續性與多項生態系服務（如產水量、碳儲存、氮磷營能鹽留存、沉積物留存及都市降溫）呈正相關，顯示永續農業與生態功能具有協同潛力。表現之區域多位於臺中東部與郊區（如和平、新社、東勢），擁有較高人均耕地面積與低人口密度，有利維持自然功能與降低環境負荷。這些區域農業模式常與自然生態相容，如坡地果樹與混農林業，不僅維持糧食供應，亦促進碳儲存、水資源涵養能力及降溫功能。此結果支持推動低投入、環境友善農業，作為地方資源治理與氣候調適政策之重要依據。

## 第六章、結論與建議



### 6.1 結論

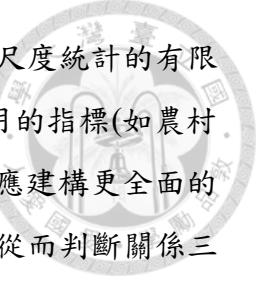
本研究使用 InVEST 模式去探討臺中市七項生態系服務(包括產水量、碳儲存、作物生產、氮、磷營養鹽留存、沉積物留存及都市降溫)之時空變化、生態系服務熱點、生態系服務間、水-能源-糧食鏈結永續性間之權衡關係，亦評估多項生態系服務與水-能源-糧食鏈結永續性之間的耦合協調度關係及權衡關係，結論如下：

1. 根據生態系服務的熱點疊加結果，臺中市 2007 年、2014 年、2021 年具有四種(含)以上生態系服務熱點分別占整個縣市的 36.7%、36.1%、37.8%，其中以林地為主(79 %)，顯示出自然植被覆蓋對生態系服務的重要性。
2. 臺中市生態系服務整體以協同關係為主，惟作物生產、產水量與都市降溫等服務長期與其他服務呈現競合或不穩定關係，主因多與作物類型及降雨的時空分布特性有關。歷年權衡關係大致一致，整體協同關係則呈現穩定增強趨勢。
3. 臺中市永續性表現呈現顯著區域差異，森林覆蓋率高的東部山區在水與糧食子系統方面展現穩定且高度之永續性；反之，西部部分地區受都市化發展、人口集中及農業用水需求影響，導致水與糧食永續性長期偏低。能源子系統則以大雅、西屯等工業發展區永續性表現較佳。整體而言，空間分佈差異明確，且未見顯著改善趨勢。
4. 臺中市水與糧食子系統因資源分布高度重疊，展現穩定且顯著之協同關係；反觀能源與水及糧食子系統則因資源配置及空間分佈差異，分別呈現無相關及弱競合關係，能源與糧食子系統在 2021 年此趨勢更為明顯。
5. 臺中市各行政區生態系服務與 WEF Nexus 永續性之協調程度具有顯著時空差異與空間異質性，主要受到降雨分佈、土地利用型態、生態基礎條件及指標標準化方法等因素影響。其中森林區的和平區因具良好森林覆蓋與資源涵養能力，長期在產水量、碳儲存、氮、磷營養鹽留存、沉積物留存與都市降溫等項目展現高度協調；反之，都市核心區與平原農業區因土地壓力與資源配置限制，常呈現不協調狀態。

6. 臺中市根據 2007 年、2014 年與 2021 年三個時期的分析結果，水子系統與糧食子系統在大部分情況下與產水量、碳儲存、氮、磷營養鹽留存、沉積物留存及都市降溫等生態系服務呈現中至高度顯著的協同關係，能源子系統則與作物生產穩定呈現顯著協同關係，然而與其他生態服務的關聯較弱產生競合關係，作物生產與水及糧食子系統間由於資源上之空間異質性則普遍呈現弱競合或無顯著相關。
7. 研究建議東部應劃設發展邊界並推動生態修復，以穩定生態服務；西部與都市區應強化綠色基礎建設與退耕還林，改善生態功能。此外，加強水資源管理、提高灌溉效率，並適度擴大耕地可提升糧食與水資源永續性。都市區應因應未來產水增加與降雨西移趨勢，發展海綿城市與節水工程，以降低洪澇風險並提升城市韌性。未來應從整合性角度調整空間與資源配置，促進跨系統協同發展。

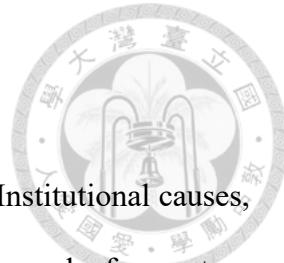
## 6.2 建議

1. 本研究用於量化生態系服務之 InVEST 模式及所輸入之相關參數的選擇，所存在的侷限性增加了量化結果的不確定性，因此建議同時使用生態系服務相關的其他模式，例如結合 SWAT 補足 InVEST 模式在水資源模擬的時序分析與農業面源污染傳輸模擬上的不足，也可用於驗證 InVEST 模式中產水量與氮磷留存模組結果的可信度。及整合 ARIES 等共同進行比較，加以評估其結果。
2. 生態系服務的驗證部分，如產水量是採用前人的論文所驗證之中部地區的結果進行設定，未來可以採用相同方式來針對臺中市做驗證，使其傑過更具代表性且精準。
3. 都市降溫的計算在本研究中把和平區(主要為林地)納入考量，由於本研究需要進行各行政區的比較，而其結果也顯示出都市降溫顯著區域幾乎均位於此區域，未來進行相關的研究時可以考慮是否只計算都市範圍區域，以減少誤差，更真實的反應出實際都市降溫的現狀。
4. 本研究建議未來可以從 WEF Nexus 視角出發，系統性評估生態系服務的供給與需求關係，進一步識別其時空分布特徵與供需匹配模式，透過此方式辨識不同區域資源配置的優先順序，優化土地與水資源利用策略，進而改善區域生態環境，去達成資源永續與協同治理的目標。

- 
5. 本研究在水-能源-糧食鏈結永續性的指標選取上，考慮到城市尺度統計的有限性，一些能夠反映水與糧食、糧食與能源及水與能源相互作用的指標(如農村電力消耗佔比)沒有被納入評估指標系統。因此，未來的研究應建構更全面的評估指標體系，以更好地揭示三大關係資源之間的相互作用，從而判斷關係三個子系統的整合程度。
  6. 本研究中 WEF Nexus 永續性與生態系服務之間的 CCD 閾值參考了其他研究採用等權重方案  $\alpha = \beta = 0.5$ ，承認 WEF Nexus 永續性與綜合生態系服務對永續未來的貢獻是相等的。但由於研究視角的差異，該門檻可能不完全適合本文。因此，在未來的研究中，應研究 CCD 的最佳閾值，或是可以透過主觀方法如層次分析法 (AHP) 等方式來決定其權重，以更好地評估 WEF Nexus 永續性與多種生態系服務之間的協同作用。

這些建議將有助於未來相關研究更深入地探討生態系服務與水—能源—糧食永續性之間的關聯性，並據此提出更具體可行的政策建議與管理對策，促進資源的整合治理與永續發展。

## 第七章、參考文獻



- Acemoglu, D., Johnson, S., Robinson, J., & Thaicharoen, Y. (2003). Institutional causes, macroeconomic symptoms: volatility, crises and growth. *Journal of monetary economics*, 50(1), 49-123.
- Acheampong, A. O., Nghiem, X.-H., Dzator, J., & Rajaguru, G. (2023). Promoting energy inclusiveness: Is rural energy poverty a political failure? *Utilities Policy*, 84, 101639.
- Acheampong, A. O., & Opoku, E. E. O. (2023). Energy justice, democracy and deforestation. *Journal of Environmental Management*, 341, 118012.
- Anselin, L. (1995). Local indicators of spatial association—LISA. *Geographical analysis*, 27(2), 93-115.
- Aslam, A., Rana, I. A., & Bhatti, S. S. J. E. I. A. R. (2021). The spatiotemporal dynamics of urbanisation and local climate: A case study of Islamabad, Pakistan. *Environmental Impact Assessment Review*, 91, 106666.
- Assessment, M. E. (2001). Millennium ecosystem assessment (Vol. 2): Millennium Ecosystem Assessment Washington, DC, USA.
- Babulo, B., Muys, B., Nega, F., Tollens, E., Nyssen, J., Deckers, J., & Mathijs, E. (2009). The economic contribution of forest resource use to rural livelihoods in Tigray, Northern Ethiopia. *Forest policy and Economics*, 11(2), 109-117.
- Bagstad, K. J., Semmens, D. J., Waage, S., & Winthrop, R. (2013). A comparative assessment of decision-support tools for ecosystem services quantification and valuation. *Ecosystem Services*, 5, 27-39.
- Bai, Y., Ochuodho, T. O., & Yang, J. (2019). Impact of land use and climate change on

water-related ecosystem services in Kentucky, USA. *Ecological Indicators*, 102, 51-64.

Bai, Y., Ochuodho, T. O., Yang, J., & Agyeman, D. A. (2021). Bundles and hotspots of multiple ecosystem services for optimized land management in Kentucky, United States. *Land*, 10(1), 69.

Bai, Y., Zhuang, C., Ouyang, Z., Zheng, H., & Jiang, B. (2011). Spatial characteristics between biodiversity and ecosystem services in a human-dominated watershed. *Ecological Complexity*, 8(2), 177-183.

Bateman, I. J., Harwood, A. R., Mace, G. M., Watson, R. T., Abson, D. J., Andrews, B., ... Dugdale, S. (2013). Bringing ecosystem services into economic decision-making: land use in the United Kingdom. *341(6141)*, 45-50.

Beck, T., & Nesmith, C. (2001). Building on poor people's capacities: the case of common property resources in India and West Africa. *World Development*, 29(1), 119-133.

Best, R., & Burke, P. J. (2017). The importance of government effectiveness for transitions toward greater electrification in developing countries. *Energies*, 10(9), 1247.

Bhaduri, A., Ringler, C., Dombrowski, I., Mohtar, R., & Scheumann, W. (2015). Sustainability in the water–energy–food nexus. In (Vol. 40, pp. 723-732): Taylor & Francis.

Bidoglio, G., & Brander, L. (2016). Enabling management of the water-food-energy-ecosystem services nexus. In (Vol. 17, pp. 265-267). *Ecosystem Services*: Elsevier.

Brown, D. G., Verburg, P. H., Pontius Jr, R. G., & Lange, M. D. (2013). Opportunities to improve impact, integration, and evaluation of land change models. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5(5), 452-457.

Chai, J., Shi, H., Lu, Q., & Hu, Y. (2020). Quantifying and predicting the Water-Energy-Food-Economy-Society-Environment Nexus based on Bayesian networks-a case study of China. *Journal of Cleaner Production*, 256, 120266.

Chaplin-Kramer, R., Sharp, R. P., Weil, C., Bennett, E. M., Pascual, U., Arkema, K. K., . . . Haddad, N. M. (2019). Global modeling of nature's contributions to people. 366(6462), 255-258.

Chaudhary, A., Gustafson, D., & Mathys, A. (2018). Multi-indicator sustainability assessment of global food systems. *Nature communications*, 9(1), 848.

Chen, H., Yan, W., Li, Z., Wende, W., Xiao, S., Wan, S., & Li, S. (2022). Spatial patterns of associations among ecosystem services across different spatial scales in metropolitan areas: A case study of Shanghai, China. *Ecological Indicators*, 136, 108682.

Chen, J., Ding, T., Wang, H., Yu, X. J. I. J. o. E. R., & Health, P. (2019). Research on total factor productivity and influential factors of the regional water-energy-food nexus: A case study on Inner Mongolia, China. 16(17), 3051.

Chen, L., Yao, Y., Xiang, K., Dai, X., Li, W., Dai, H., . . . Zhang, Y. (2024). Spatial-temporal pattern of ecosystem services and sustainable development in representative mountainous cities: A case study of Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration. *Journal of Environmental Management*, 368, 122261.

Chen, P. (2021). Effects of the entropy weight on TOPSIS. 168, 114186.

Chen, P., Feng, Z., Mannan, A., Chen, S., & Ullah, T. (2019). Assessment of soil loss from land use/land cover change and disasters in the Longmen Shan Mountains, China. *Applied Ecology Environmental Research*, 17(5).

Connor, R. (2015). The United Nations world water development report 2015: water for

- a sustainable world (Vol. 1): UNESCO publishing.
- Costanza, R., d'Arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., . . . Paruelo, J. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *387(6630)*, 253-260.
- Council, N. I. (2012). Global trends 2030: Alternative worlds: a publication of the National Intelligence Council: US Government Printing Office.
- Daneshi, A., Brouwer, R., Najafinejad, A., Panahi, M., Zarandian, A., & Maghsoud, F. F. (2021). Modelling the impacts of climate and land use change on water security in a semi-arid forested watershed using InVEST. *Journal of Hydrology*, 593, 125621.
- De Jesus Crespo, R., Valladares-Castellanos, M., Mihunov, V. V., & Douthat, T. (2023). Going with the flow: the supply and demand of sediment retention ecosystem services for the reservoirs in Puerto Rico. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1214037.
- Dennedy-Frank, P. J., Muenich, R. L., Chaubey, I., & Ziv, G. (2016). Comparing two tools for ecosystem service assessments regarding water resources decisions. *Journal of Environmental Management*, 177, 331-340.
- 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.
- 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 Consumption*, 35, 184-200.

Ding, Y., & Peng, J. (2018). Impacts of urbanization of mountainous areas on resources and environment: Based on ecological footprint model. *Sustainability*, 10(3), 765.

Donohue, R. J., Roderick, M. L., & McVicar, T. R. (2012). Roots, storms and soil pores: Incorporating key ecohydrological processes into Budyko's hydrological model. *Journal of Hydrology*, 436, 35-50.

Finegold, Y., & Ortmann, A. (2016). Map accuracy assessment and area estimation: a practical guide.

Fisher, P., Comber, A. J., & Wadsworth, R. (2005). Land use and land cover: contradiction or complement. 85, 98.

Goldstein, J. H., Calderone, G., Duarte, T. K., Ennaanay, D., Hannahs, N., Mendoza, G., . . . Daily, G. C. (2012). Integrating ecosystem-service tradeoffs into land-use decisions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*

109(19), 7565-7570.

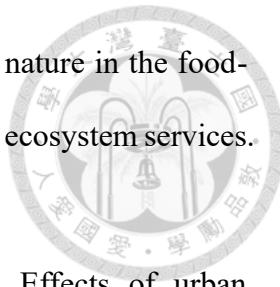
Griggs, D., Stafford-Smith, M., Gaffney, O., Rockström, J., Öhman, M. C., Shyamsundar, P., . . . Noble, I. (2013). Sustainable development goals for people and planet. 495(7441), 305-307.

Hamel, P., Chaplin-Kramer, R., Sim, S., & Mueller, C. J. S. o. t. T. E. (2015). A new approach to modeling the sediment retention service (InVEST 3.0): Case study of the Cape Fear catchment, North Carolina, USA. 524, 166-177.

Han, B., Reidy, A., & Li, A. (2021). Modeling nutrient release with compiled data in a typical Midwest watershed. *Ecological Indicators*, 121, 107213.

Han, D., Yu, D., & Cao, Q. (2020). Assessment on the features of coupling interaction of the food-energy-water nexus in China. *Journal of Cleaner Production*, 249, 119379.

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 Recycling*, 137, 214-228.



Heidari, H., Arabi, M., Warziniack, T., & Sharvelle, S. (2021). Effects of urban development patterns on municipal water shortage. *Frontiers in Water*, 3, 694817.

Hoff, H. (2011). Understanding the nexus.

Hoyer, R., & Chang, H. (2014). Assessment of freshwater ecosystem services in the Tualatin and Yamhill basins under climate change and urbanization. *Applied Geography*, 53, 402-416.

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.

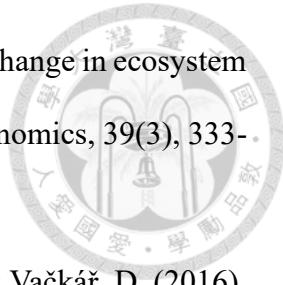
Hui, X., Yiwen, W., Zongyan, Z., Yigong, G., & Dawei, Z. (2021). Coupling mechanism of water-energy-food and spatiotemporal evolution of coordinated development in the Yellow River Basin. *Resources Science*, 43(12), 2526-2537.

Jame, A., Noizat, C., Morin, E., Paulhac, H., Guinard, Y., Rodier, T., . . . Preux, T. (2024). A combination of methods for mapping heat and cool areas in past and current urban landscapes of Poitiers (France). *Ecological Indicators*, 167, 112712.

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 Recycling*, 134, 282-293.

Kammerlander, A., & Schulze, G. G. (2021). Political-economic correlates of environmental policy. *Environmental Research Letters*, 16(2), 024047.

Kreuter, U. P., Harris, H. G., Matlock, M. D., & Lacey, R. E. (2001). Change in ecosystem service values in the San Antonio area, Texas. *Ecological Economics*, 39(3), 333-346.



Krkoška Lorencová, E., Harmáčková, Z. V., Landová, L., Pártl, A., & Vačkář, D. (2016). Assessing impact of land use and climate change on regulating ecosystem services in the Czech Republic. *Ecosystem Health Sustainability*, 2(3), e01210.

Lautenbach, S., Kugel, C., Lausch, A., & Seppelt, R. (2011). Analysis of historic changes in regional ecosystem service provisioning using land use data. *Ecological Indicators*, 11(2), 676-687.

Li, W., Kang, J., & Wang, Y. (2024). Identifying the impacts of landscape structure on ecosystem services trade-offs among ecosystem services bundles in the mountains of Southwest China. *Ecological Engineering*, 209, 107419.

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.

Li, Y., Li, Y., Zhou, Y., Shi, Y., & Zhu, X. (2012). Investigation of a coupling model of coordination between urbanization and the environment. *Journal of Environmental Management*, 98, 127-133.

Liao, C. B. (1999). Quantitative judgement and classification system for coordinated development of environment and economy: A case study of the city group in the Pearl River Delta. *Tropical Geography*, 19(2), 171-177.

Liu, M., Wei, H., Dong, X., Wang, X.-C., Zhao, B., & Zhang, Y. (2022). Integrating land use, ecosystem service, and human well-being: A systematic review. 14(11), 6926.

Lu, J., Cheng, Y., Qi, X., Chen, H., & Lin, X. (2024). Rethinking urban wilderness: Status,

- hotspots, and prospects of ecosystem services. *Journal of Environmental Management*, 364, 121366.
- Lu, Y., & Qin, F. (2024). Improvements in the InVEST water purification model for detecting spatio-temporal changes in total nitrogen and total phosphorus discharges in the Huai river watershed, China. *Journal of Environmental Management*, 366, 121918.
- McIntyre, N., Moore, J., & Yuan, M. (2008). A place-based, values-centered approach to managing recreation on Canadian crown lands. *Society Natural Resources*, 21(8), 657-670.
- Moran, P. A. (1950). Notes on continuous stochastic phenomena. 37(1/2), 17-23.
- Nadaraja, D., Lu, C., & Islam, M. M. (2021). The sustainability assessment of plantation agriculture-a systematic review of sustainability indicators. *Sustainable Production Consumption*, 26, 892-910.
- Nelson, G. C., Rosegrant, M. W., Koo, J., Robertson, R., Sulser, T., Zhu, T., . . . Batka, M. (2009). Climate change: Impact on agriculture and costs of adaptation (Vol. 21): Intl Food Policy Res Inst.
- Opoku, E. E. O., Acheampong, A. O., & Aluko, O. A. (2024). Impact of rural-urban energy equality on environmental sustainability and the role of governance. *Journal of Policy Modeling*, 46(2), 304-335.
- 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.
- 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*

Environment, 728, 138451.

Qiu, H., Zhang, J., Han, H., Cheng, X., & Kang, F. (2023). Study on the impact of vegetation change on ecosystem services in the Loess Plateau, China. *Ecological Indicators*, 154, 110812.

Rasul, G. (2014). Food, water, and energy security in South Asia: A nexus perspective from the Hindu Kush Himalayan region☆. *Environmental Science Policy*, 39, 35-48.

Reyers, B., & Selig, E. R. (2020). Global targets that reveal the social–ecological interdependencies of sustainable development. *Nature Ecology Evolution*, 4(8), 1011-1019.

Roy, P. S., Ramachandran, R. M., Paul, O., Thakur, P. K., Ravan, S., Behera, M. D., . . . Kanawade, V. P. (2022). Anthropogenic land use and land cover changes—A review on its environmental consequences and climate change. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 50(8), 1615-1640.

Saladini, F., Betti, G., Ferragina, E., Bouraoui, F., Cupertino, S., Canitano, G., . . . Riccaboni, A. (2018). Linking the water-energy-food nexus and sustainable development indicators for the Mediterranean region. *Ecological Indicators*, 91, 689-697.

Sharp, R., Tallis, H., & Ricketts, T. (2015). InVEST 3.2. 0 User's Guide. The Natural Capital Project. Stanford University, University of Minnesota. The Nature Conservancy World Wildlife Fund, 123-156.

SHEN, J.-s., LI, S.-c., LIANG, Z., WANG, Y.-y., & SUN, F.-y. (2021). Research progress and prospect for the relationships between ecosystem services supplies and demands. *Journal of Natural Resources*, 36(8), 1909-1922.

Shi, Y., Ge, X., Yuan, X., Wang, Q., Kellett, J., Li, F., & Ba, K. (2019). An integrated indicator system and evaluation model for regional sustainable development. *11*(7), 2183.

Su, Y., Chen, X., Li, Y., & Wang, Y. (2024). The robustness mechanism of the rural social-ecological system in response to the impact of urbanization——Evidence from irrigation commons in China. *World Development*, 178, 106565.

Sun, C., & Hao, S. (2022). Research on the competitive and synergistic evolution of the water-energy-food system in China. *Journal of Cleaner Production*, 365, 132743.

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.

Tang, J., Li, Y., Cui, S., Xu, L., Ding, S., & Nie, W. (2020). Linking land-use change, landscape patterns, and ecosystem services in a coastal watershed of southeastern China. *Global Ecology and Conservation*, 23, e01177.

Thornton, J. M., Snethlage, M. A., Sayre, R., Urbach, D. R., Vivioli, D., Ehrlich, D., . . . Adler, C. (2022). Human populations in the world's mountains: Spatio-temporal patterns and potential controls. *PLoS One*, 17(7), e0271466.

Tsai, C. W., Lin, M.-L., & Tung, J. Y. (2024). Spatial and temporal evolution of heatwaves in Taiwan in a changing climate using multi-dimensional complementary ensemble empirical mode decomposition. *Ecological Informatics*, 81, 102585.

Tzeng, G.-H., & Huang, J.-J. (2011). *Multiple attribute decision making: methods and applications*: CRC press.

Unep, D. J. R. c. f. w. u. g., & digital technologies. (2021). *Partnership and United Nations*

- Environment Programme (2021).
- Vallet, A., Locatelli, B., Levrel, H., Wunder, S., Seppelt, R., Scholes, R. J., & Oszwald, J. (2018). Relationships between ecosystem services: comparing methods for assessing tradeoffs and synergies. *Ecological Economics*, 150, 96-106.
- Verburg, P. H. (2006). Simulating feedbacks in land use and land cover change models. *Landscape Ecology*, 21, 1171-1183.
- Verma, P., & Raghubanshi, A. S. (2018). Urban sustainability indicators: Challenges and opportunities. *Ecological Indicators*, 93, 282-291.
- Vitousek, P. M. (1994). Beyond global warming: ecology and global change. *75(7)*, 1861-1876.
- Wang, K., Li, X., Lyu, X., Dang, D., Cao, W., & Du, Y. (2024). Unraveling the complex interconnections between food-energy-water nexus sustainability and the supply-demand of related ecosystem services. *Journal of Environmental Management*, 370, 122532.
- 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.
- 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.
- Weitzman, J. N., & Kaye, J. P. (2016). Variability in soil nitrogen retention across forest, urban, and agricultural land uses. *Ecosystems*, 19, 1345-1361.
- Wood, S. L., Jones, S. K., Johnson, J. A., Brauman, K. A., Chaplin-Kramer, R., Fremier,

- A., . . . Mandle, L. (2018). Distilling the role of ecosystem services in the Sustainable Development Goals. *Ecosystem Services*, 29, 70-82.
- Woznicki, S. A., Cada, P., Wickham, J., Schmidt, M., Baynes, J., Mehaffey, M., & Neale, A. (2020). Sediment retention by natural landscapes in the conterminous United States. *Science of the Total Environment*, 745, 140972.
- Wu, C., Liu, W., & Deng, H. (2023). Urbanization and the emerging water crisis: identifying water scarcity and environmental risk with multiple applications in urban agglomerations in Western China. *Sustainability*, 15(17), 12977.
- Wu, L., Elshorbagy, A., Pande, S., & Zhuo, L. (2021). Trade-offs and synergies in the water-energy-food nexus: The case of Saskatchewan, Canada. *Resources, Conservation Recycling*, 164, 105192.
- Xu, M., Xu, G., Liu, S., Li, J., Li, Z., Cheng, Y., . . . Gu, F. (2025). Changes in water conservation and a new estimation for its future potential. *CATENA*, 250, 108761.
- 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.
- 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.
- Yin, H., Xiao, R., Fei, X., Zhang, Z., Gao, Z., Wan, Y., . . . Guo, Y. (2023). Analyzing “economy-society-environment” sustainability from the perspective of urban spatial structure: A case study of the Yangtze River delta urban agglomeration. *Sustainable Cities Society Natural Resources*, 96, 104691.

Yonaba, R., Koïta, M., Mounirou, L., Tazen, F., Queloz, P., Biaou, A., . . . Yacouba, H.

(2021). Spatial and transient modelling of land use/land cover (LULC) dynamics in a Sahelian landscape under semi-arid climate in northern Burkina Faso. *Land use policy*, 103, 105305.

Yuan, M.-H., & Lo, S.-L. (2020). Ecosystem services and sustainable development: Perspectives from the food-energy-water Nexus. *Ecosystem Services*, 46, 101217.

Zeren Cetin, I., & Sevik, H. (2020). Investigation of the relationship between bioclimatic comfort and land use by using GIS and RS techniques in Trabzon. *Environmental monitoring assessment*, 192, 1-14.

Zeren Cetin, I., Varol, T., & Ozel, H. B. (2023). A geographic information systems and remote sensing-based approach to assess urban micro-climate change and its impact on human health in Bartin, Turkey. *Environmental monitoring assessment*, 195(5), 540.

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 Recycling*, 183, 106357.

Zhang, Y., Fu, B., & Sun, J. (2022). Heat wave mitigation of ecosystems in mountain areas—a case study of the Upper Yangtze River basin. *Ecosystem Health and Sustainability*, 8(1), 2084459.

Zhang, Y., & Wang, Y. (2024). Evaluation and prediction of water-energy-food nexus under land use changes in the Yellow River Basin, China. *Sustainable Futures*, 8, 100307.

Zhao, L., Liu, S., & Sun, C. (2021). Study on coupling and coordinated development of water-energy-food security system in the Yellow River Basin. 37, 69-78.

Zhao, R., Liu, Y., Tian, M., Ding, M., Cao, L., Zhang, Z., . . . Yao, L. (2018). Impacts of water and land resources exploitation on agricultural carbon emissions: The water-land-energy-carbon nexus. *Land use policy*, 72, 480-492.

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.

Zorrilla-Miras, P., Palomo, I., Gómez-Baggethun, E., Martín-López, B., Lomas, P. L., & Montes, C. (2014). Effects of land-use change on wetland ecosystem services: A case study in the Doñana marshes (SW Spain). *Landscape Urban Planning*, 122, 160-174.

周品樺. (2024). 氣候與土地利用變遷下的生態系服務時空熱點與權衡關係—以陳有蘭溪流域為例. (碩士). 國立臺灣大學, 台北市. Retrieved from <https://hdl.handle.net/11296/4q4y7m> 臺灣博碩士論文知識加值系統 database.

林真真, 郝飛洋, & 黃禹馨. (2017). 地震之空間聚集性研究-以 921 地震為例. *智慧科技與應用統計學報*, 15(2), 1-12.

張文豪. (2018). 以系統性保育規劃法評估氣候變遷對生態系服務的影響-以陳有蘭溪流域為例. (碩士). 國立臺灣大學, 台北市. Retrieved from <https://hdl.handle.net/11296/6bkumq> 臺灣博碩士論文知識加值系統 database.

張宸瑄. (2024). 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 (碩士). 國立台灣大學, 台北市.

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. (碩士). 國立臺灣大學, 台北市. Retrieved from





## 附錄

熵權法計算的詳細結果如表 20 至表 22 為三個子系統各項正向及負向指標的原始資料，表 23 至表 25 為原始資料依公式(50)及(51)進行標準化後之結果，表 26 至表 28 為各項子系統指標透過公式(52)、(53)所得出之熵值結果，表 29 至表 31 為熵值結果根據公式(54-56)計算每個子系統中指標的權重，表 32 至表 34 為三個子系統的各項指標永續性評估值，表 35 為經由公式(57-59)計算出三個子系統的永續性評估值。

表 20 水永續性指標原始數值

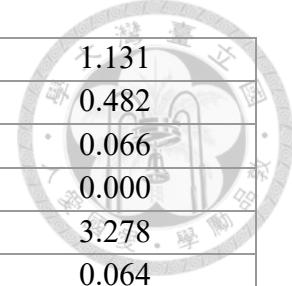
	人均水資源	人均用水量	單位 GDP 用水量	工業額外產值 用水量	水資源利用率	廢(污)水量
大甲區	816.017	821.189	17.347	8.819	1.006	5997608.320
大安區	1448.855	1780.997	51.468	27.814	1.229	907340.760
大肚區	834.939	614.957	13.684	16.559	0.737	1036901.600
大里區	225.815	288.527	6.114	26.353	1.278	2050498.800
大雅區	576.280	424.372	3.864	13.620	0.736	9254391.800
中 區	55.103	173.627	4.593	52.218	3.151	0.000
太平區	1226.686	521.550	10.710	35.657	0.425	2493141.510
北 區	71.756	179.402	3.973	60.490	2.500	775291.050
北屯區	439.504	252.721	5.473	29.859	0.575	483566.150
外埔區	1459.073	1426.165	35.595	38.561	0.977	84165.110
石岡區	2064.695	915.822	24.789	225.262	0.444	43787459.000

后里區	1405.646	1064.371	3.511	14.126	0.757	35019436.730
西 區	71.928	176.126	4.054	69.862	2.449	0.000
西屯區	298.689	267.031	2.873	1.854	0.894	5272590.000
沙鹿區	719.156	527.006	11.321	16.705	0.733	2371301.780
和平區	216161.448	10720.536	232.113	0.000	0.050	76734.000
東 區	192.503	239.547	5.425	40.589	1.244	793844.600
東勢區	4200.514	1458.846	39.580	88.410	0.347	109972.300
南 區	88.762	206.215	4.192	26.348	2.323	538055.000
南屯區	293.489	302.052	5.669	7.366	1.029	778103.300
烏日區	849.509	623.468	12.869	16.174	0.734	7409837.700
神岡區	833.017	637.302	12.879	20.896	0.765	754561.200
梧棲區	400.451	383.121	5.357	9.026	0.957	3608120.200
清水區	912.010	698.456	15.713	31.817	0.766	2749757.000
新社區	5225.700	2108.296	59.894	61.703	0.403	18427.000
潭子區	443.542	482.489	6.250	3.538	1.088	4276047.000
龍井區	695.786	541.746	11.616	11.089	0.779	27395495.950
豐原區	421.300	314.432	7.679	30.760	0.746	1442713.220
霧峰區	2408.418	1382.413	32.904	20.042	0.574	911980.800



表 21 能源永續性指標原始數值

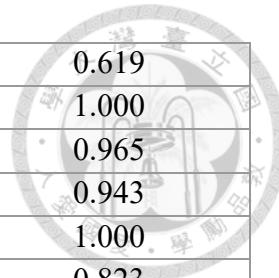
	人均能源消耗量	單位 GDP 能源消耗量	單位 GDP 碳排放量	工業固體廢棄物產生量	電氣化比例	科技投資佔 GDP 的百分比
大甲區	3667.732	0.008	0.054	176478.870	2323.636	2.279
大安區	1713.268	0.010	0.050	11343.035	1085.415	0.046
大肚區	2865.629	0.008	0.037	106814.194	1815.476	0.479
大里區	2156.931	0.008	0.034	176307.782	1366.491	0.599
大雅區	15339.184	0.003	0.015	417450.609	9717.909	3.719
中區	2921.117	0.009	0.045	480.846	1850.630	0.000
太平區	2387.216	0.007	0.033	170079.295	1512.385	0.204
北區	2036.866	0.008	0.036	2672.240	1290.426	0.000
北屯區	1510.977	0.008	0.035	8098.282	957.257	0.001
外埔區	1843.863	0.009	0.042	32700.890	1168.152	0.926
石岡區	1528.225	0.010	0.047	4484.488	968.184	0.016
后里區	22447.228	0.001	0.014	277947.604	14221.103	1.355
西區	2281.755	0.008	0.037	657.443	1445.572	0.000
西屯區	13558.130	0.004	0.017	550371.886	8589.549	2.415
沙鹿區	2647.325	0.008	0.035	45886.998	1677.173	0.481
和平區	1910.751	0.008	0.039	0.000	1210.527	0.000
東區	1777.956	0.008	0.037	29183.001	1126.397	0.045
東勢區	811.153	0.010	0.045	1591.101	513.894	0.000
南區	1972.992	0.007	0.033	19705.254	1249.959	0.000
南屯區	3980.632	0.007	0.050	221532.935	2521.869	1.132
烏日區	3523.355	0.007	0.074	95005.496	2232.168	0.274



神岡區	3693.060	0.007	0.033	201476.252	2339.682	1.131
梧棲區	10396.513	0.005	0.023	282491.186	6586.554	0.482
清水區	2261.746	0.008	0.037	58162.874	1432.895	0.066
新社區	1661.936	0.010	0.048	3212.373	1052.894	0.000
潭子區	4811.751	0.005	0.040	176197.056	3048.412	3.278
龍井區	5008.241	0.008	0.055	218217.857	3172.896	0.064
豐原區	1715.553	0.009	0.039	77055.235	1086.863	0.168
霧峰區	2964.893	0.008	0.039	78860.930	1878.363	0.538

表 22 糧食永續性指標原始數值

	人均糧食種植面積	糧食種植面積比例	人均糧食生產	單位面積糧食生產量	化肥負荷量	農業產值比重
大甲區	0.054	0.516	0.284	7.465	6.812	0.881
大安區	0.153	0.764	0.697	6.917	10.096	0.617
大肚區	0.027	0.372	0.214	8.694	4.919	0.810
大里區	0.005	0.233	0.030	8.625	3.077	0.725
大雅區	0.015	0.347	0.087	6.824	4.582	0.565
中區	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
太平區	0.015	0.225	0.140	8.806	2.976	0.959
北區	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
北屯區	0.004	0.182	0.047	9.939	2.403	1.000
外埔區	0.093	0.584	0.561	7.219	7.712	0.811
石岡區	0.034	0.413	0.538	11.579	5.451	0.998

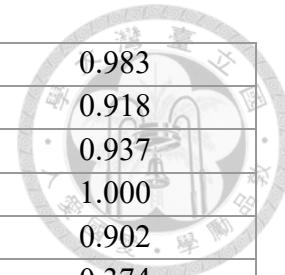


后里區	0.052	0.505	0.464	8.500	6.676	0.619
西 區	0.000	0.001	0.000	9.615	0.012	1.000
西屯區	0.004	0.190	0.023	5.944	2.515	0.965
沙鹿區	0.014	0.410	0.271	12.815	5.422	0.943
和平區	1.617	0.071	36.529	22.166	0.941	1.000
東 區	0.000	0.002	0.000	14.667	0.021	0.823
東勢區	0.079	0.386	1.313	15.862	5.100	0.999
南 區	0.000	0.025	0.001	8.235	0.330	1.000
南屯區	0.006	0.342	0.029	3.957	4.517	0.982
烏日區	0.035	0.390	0.199	7.934	5.156	0.622
神岡區	0.025	0.389	0.199	9.393	5.135	0.868
梧棲區	0.018	0.319	0.062	6.342	4.217	0.878
清水區	0.046	0.429	0.296	9.245	5.671	0.925
新社區	0.099	0.465	1.335	10.752	6.144	0.995
潭子區	0.017	0.613	0.142	8.740	8.097	0.935
龍井區	0.032	0.391	0.153	7.386	5.169	0.932
豐原區	0.006	0.219	0.055	10.094	2.896	0.922
霧峰區	0.077	0.494	0.557	7.414	6.521	0.864

表 23 水永續性指標標準化數值



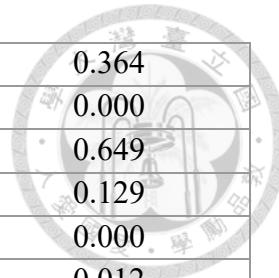
	人均水資源	人均用水量	單位 GDP 用水量	工業額外產值 用水量	水資源利用率	廢(污)水量
大甲區	0.004	0.939	0.937	0.961	0.692	0.863
大安區	0.006	0.848	0.788	0.877	0.620	0.979
大肚區	0.004	0.958	0.953	0.926	0.779	0.976
大里區	0.001	0.989	0.986	0.883	0.604	0.953
大雅區	0.002	0.976	0.996	0.940	0.779	0.789
中 匸	0.000	1.000	0.992	0.768	0.000	1.000
太平區	0.005	0.967	0.966	0.842	0.879	0.943
北 匸	0.000	0.999	0.995	0.731	0.210	0.982
北屯區	0.002	0.993	0.989	0.867	0.831	0.989
外埔區	0.006	0.881	0.857	0.829	0.701	0.998
石岡區	0.009	0.930	0.904	0.000	0.873	0.000
后里區	0.006	0.916	0.997	0.937	0.772	0.200
西 匸	0.000	1.000	0.995	0.690	0.226	1.000
西屯區	0.001	0.991	1.000	0.992	0.728	0.880
沙鹿區	0.003	0.966	0.963	0.926	0.780	0.946
和平區	1.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.998
東 匸	0.001	0.994	0.989	0.820	0.615	0.982
東勢區	0.019	0.878	0.840	0.608	0.904	0.997
南 匸	0.000	0.997	0.994	0.883	0.267	0.988
南屯區	0.001	0.988	0.988	0.967	0.684	0.982
烏日區	0.004	0.957	0.956	0.928	0.779	0.831



神岡區	0.004	0.956	0.956	0.907	0.769	0.983
梧棲區	0.002	0.980	0.989	0.960	0.708	0.918
清水區	0.004	0.950	0.944	0.859	0.769	0.937
新社區	0.024	0.817	0.751	0.726	0.886	1.000
潭子區	0.002	0.971	0.985	0.984	0.665	0.902
龍井區	0.003	0.965	0.962	0.951	0.765	0.374
豐原區	0.002	0.987	0.979	0.863	0.775	0.967
霧峰區	0.011	0.885	0.869	0.911	0.831	0.979

表 24 能源永續性指標標準化數值

	人均能源消耗量	單位 GDP 能源消耗量	單位 GDP 碳排放量	工業固體廢棄物產生量	電氣化比例	科技投資佔 GDP 的百分比
大甲區	0.868	0.304	0.325	0.679	0.132	0.613
大安區	0.958	0.000	0.404	0.979	0.042	0.012
大肚區	0.905	0.260	0.621	0.806	0.095	0.129
大里區	0.938	0.301	0.660	0.680	0.062	0.161
大雅區	0.329	0.773	0.982	0.242	0.671	1.000
中區	0.902	0.096	0.481	0.999	0.098	0.000
太平區	0.927	0.327	0.677	0.691	0.073	0.055
北區	0.943	0.264	0.633	0.995	0.057	0.000
北屯區	0.968	0.283	0.649	0.985	0.032	0.000
外埔區	0.952	0.154	0.533	0.941	0.048	0.249
石岡區	0.967	0.072	0.441	0.992	0.033	0.004

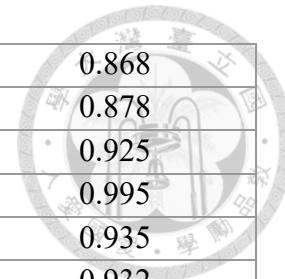


后里區	0.000	1.000	1.000	0.495	1.000	0.364
西 區	0.932	0.230	0.608	0.999	0.068	0.000
西屯區	0.411	0.709	0.940	0.000	0.589	0.649
沙鹿區	0.915	0.290	0.646	0.917	0.085	0.129
和平區	0.949	0.283	0.572	1.000	0.051	0.000
東 區	0.955	0.244	0.614	0.947	0.045	0.012
東勢區	1.000	0.069	0.487	0.997	0.000	0.000
南 區	0.946	0.335	0.680	0.964	0.054	0.000
南屯區	0.854	0.396	0.401	0.597	0.146	0.304
烏日區	0.875	0.323	0.000	0.827	0.125	0.074
神岡區	0.867	0.339	0.678	0.634	0.133	0.304
梧棲區	0.557	0.583	0.846	0.487	0.443	0.129
清水區	0.933	0.250	0.620	0.894	0.067	0.018
新社區	0.961	0.019	0.429	0.994	0.039	0.000
潭子區	0.815	0.623	0.571	0.680	0.185	0.881
龍井區	0.806	0.291	0.315	0.604	0.194	0.017
豐原區	0.958	0.175	0.573	0.860	0.042	0.045
霧峰區	0.900	0.199	0.581	0.857	0.100	0.145

表 25 糧食永續性指標標準化數值



	人均糧食種植面積	糧食種植面積比例	人均糧食生產	單位面積糧食生產量	化肥負荷量	農業產值比重
大甲區	0.033	0.675	0.008	0.337	0.675	0.881
大安區	0.095	1.000	0.019	0.312	1.000	0.617
大肚區	0.017	0.487	0.006	0.392	0.487	0.810
大里區	0.003	0.305	0.001	0.389	0.305	0.725
大雅區	0.009	0.454	0.002	0.308	0.454	0.565
中區	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
太平區	0.009	0.295	0.004	0.397	0.295	0.959
北區	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
北屯區	0.003	0.238	0.001	0.448	0.238	1.000
外埔區	0.058	0.764	0.015	0.326	0.764	0.811
石岡區	0.021	0.540	0.015	0.522	0.540	0.998
后里區	0.032	0.661	0.013	0.383	0.661	0.619
西區	0.000	0.001	0.000	0.434	0.001	1.000
西屯區	0.003	0.249	0.001	0.268	0.249	0.965
沙鹿區	0.009	0.537	0.007	0.578	0.537	0.943
和平區	1.000	0.093	1.000	1.000	0.093	1.000
東區	0.000	0.002	0.000	0.662	0.002	0.823
東勢區	0.049	0.505	0.036	0.716	0.505	0.999
南區	0.000	0.033	0.000	0.372	0.033	1.000
南屯區	0.004	0.447	0.001	0.178	0.447	0.982
烏日區	0.022	0.511	0.005	0.358	0.511	0.622



神岡區	0.016	0.509	0.005	0.424	0.509	0.868
梧棲區	0.011	0.418	0.002	0.286	0.418	0.878
清水區	0.029	0.562	0.008	0.417	0.562	0.925
新社區	0.062	0.609	0.037	0.485	0.609	0.995
潭子區	0.010	0.802	0.004	0.394	0.802	0.935
龍井區	0.020	0.512	0.004	0.333	0.512	0.932
豐原區	0.004	0.287	0.002	0.455	0.287	0.922
霧峰區	0.048	0.646	0.015	0.334	0.646	0.864

表 26 水永續性指標熵值

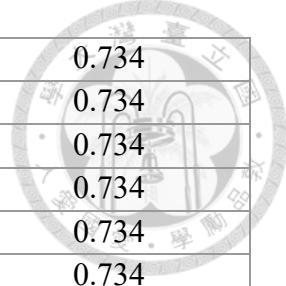
	人均水資源	人均用水量	單位 GDP 用水量	工業額外產值 用水量	水資源利用率	廢(污)水量
大甲區	0.195	0.989	0.989	0.988	0.977	0.982
大安區	0.195	0.989	0.989	0.988	0.977	0.982
大肚區	0.195	0.989	0.989	0.988	0.977	0.982
大里區	0.195	0.989	0.989	0.988	0.977	0.982
大雅區	0.195	0.989	0.989	0.988	0.977	0.982
中 區	0.195	0.989	0.989	0.988	0.977	0.982
太平區	0.195	0.989	0.989	0.988	0.977	0.982
北 區	0.195	0.989	0.989	0.988	0.977	0.982
北屯區	0.195	0.989	0.989	0.988	0.977	0.982
外埔區	0.195	0.989	0.989	0.988	0.977	0.982
石岡區	0.195	0.989	0.989	0.988	0.977	0.982

后里區	0.195	0.989	0.989	0.988	0.977	0.982
西 區	0.195	0.989	0.989	0.988	0.977	0.982
西屯區	0.195	0.989	0.989	0.988	0.977	0.982
沙鹿區	0.195	0.989	0.989	0.988	0.977	0.982
和平區	0.195	0.989	0.989	0.988	0.977	0.982
東 區	0.195	0.989	0.989	0.988	0.977	0.982
東勢區	0.195	0.989	0.989	0.988	0.977	0.982
南 區	0.195	0.989	0.989	0.988	0.977	0.982
南屯區	0.195	0.989	0.989	0.988	0.977	0.982
烏日區	0.195	0.989	0.989	0.988	0.977	0.982
神岡區	0.195	0.989	0.989	0.988	0.977	0.982
梧棲區	0.195	0.989	0.989	0.988	0.977	0.982
清水區	0.195	0.989	0.989	0.988	0.977	0.982
新社區	0.195	0.989	0.989	0.988	0.977	0.982
潭子區	0.195	0.989	0.989	0.988	0.977	0.982
龍井區	0.195	0.989	0.989	0.988	0.977	0.982
豐原區	0.195	0.989	0.989	0.988	0.977	0.982
霧峰區	0.195	0.989	0.989	0.988	0.977	0.982



表 27 能源永續性指標熵值

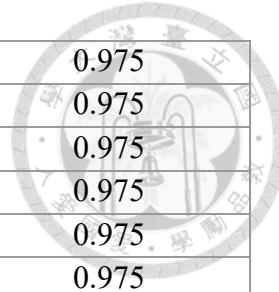
	人均能源消耗量	單位 GDP 能源消耗量	單位 GDP 碳排放量	工業固體廢棄物產生量	電氣化比例	科技投資佔 GDP 的百分比
大甲區	0.983	0.929	0.978	0.980	0.816	0.734
大安區	0.983	0.929	0.978	0.980	0.816	0.734
大肚區	0.983	0.929	0.978	0.980	0.816	0.734
大里區	0.983	0.929	0.978	0.980	0.816	0.734
大雅區	0.983	0.929	0.978	0.980	0.816	0.734
中區	0.983	0.929	0.978	0.980	0.816	0.734
太平區	0.983	0.929	0.978	0.980	0.816	0.734
北區	0.983	0.929	0.978	0.980	0.816	0.734
北屯區	0.983	0.929	0.978	0.980	0.816	0.734
外埔區	0.983	0.929	0.978	0.980	0.816	0.734
石岡區	0.983	0.929	0.978	0.980	0.816	0.734
后里區	0.983	0.929	0.978	0.980	0.816	0.734
西區	0.983	0.929	0.978	0.980	0.816	0.734
西屯區	0.983	0.929	0.978	0.980	0.816	0.734
沙鹿區	0.983	0.929	0.978	0.980	0.816	0.734
和平區	0.983	0.929	0.978	0.980	0.816	0.734
東區	0.983	0.929	0.978	0.980	0.816	0.734
東勢區	0.983	0.929	0.978	0.980	0.816	0.734
南區	0.983	0.929	0.978	0.980	0.816	0.734
南屯區	0.983	0.929	0.978	0.980	0.816	0.734
烏日區	0.983	0.929	0.978	0.980	0.816	0.734



神岡區	0.983	0.929	0.978	0.980	0.816	0.734
梧棲區	0.983	0.929	0.978	0.980	0.816	0.734
清水區	0.983	0.929	0.978	0.980	0.816	0.734
新社區	0.983	0.929	0.978	0.980	0.816	0.734
潭子區	0.983	0.929	0.978	0.980	0.816	0.734
龍井區	0.983	0.929	0.978	0.980	0.816	0.734
豐原區	0.983	0.929	0.978	0.980	0.816	0.734
霧峰區	0.983	0.929	0.978	0.980	0.816	0.734

表 28 糧食永續性指標熵值

	人均糧食種植面積	糧食種植面積比例	人均糧食生產	單位面積糧食生產量	化肥負荷量	農業產值比重
大甲區	0.487	0.923	0.275	0.961	0.923	0.975
大安區	0.487	0.923	0.275	0.961	0.923	0.975
大肚區	0.487	0.923	0.275	0.961	0.923	0.975
大里區	0.487	0.923	0.275	0.961	0.923	0.975
大雅區	0.487	0.923	0.275	0.961	0.923	0.975
中區	0.487	0.923	0.275	0.961	0.923	0.975
太平區	0.487	0.923	0.275	0.961	0.923	0.975
北區	0.487	0.923	0.275	0.961	0.923	0.975
北屯區	0.487	0.923	0.275	0.961	0.923	0.975
外埔區	0.487	0.923	0.275	0.961	0.923	0.975
石岡區	0.487	0.923	0.275	0.961	0.923	0.975

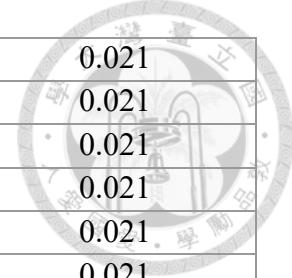


后里區	0.487	0.923	0.275	0.961	0.923	0.975
西 區	0.487	0.923	0.275	0.961	0.923	0.975
西屯區	0.487	0.923	0.275	0.961	0.923	0.975
沙鹿區	0.487	0.923	0.275	0.961	0.923	0.975
和平區	0.487	0.923	0.275	0.961	0.923	0.975
東 區	0.487	0.923	0.275	0.961	0.923	0.975
東勢區	0.487	0.923	0.275	0.961	0.923	0.975
南 區	0.487	0.923	0.275	0.961	0.923	0.975
南屯區	0.487	0.923	0.275	0.961	0.923	0.975
烏日區	0.487	0.923	0.275	0.961	0.923	0.975
神岡區	0.487	0.923	0.275	0.961	0.923	0.975
梧棲區	0.487	0.923	0.275	0.961	0.923	0.975
清水區	0.487	0.923	0.275	0.961	0.923	0.975
新社區	0.487	0.923	0.275	0.961	0.923	0.975
潭子區	0.487	0.923	0.275	0.961	0.923	0.975
龍井區	0.487	0.923	0.275	0.961	0.923	0.975
豐原區	0.487	0.923	0.275	0.961	0.923	0.975
霧峰區	0.487	0.923	0.275	0.961	0.923	0.975



表 29 水永續性指標權重

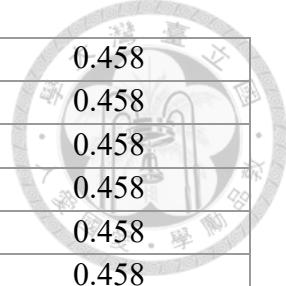
	人均水資源	人均用水量	單位 GDP 用水量	工業額外產值 用水量	水資源利用率	廢(污)水量
大甲區	0.914	0.012	0.013	0.014	0.026	0.021
大安區	0.914	0.012	0.013	0.014	0.026	0.021
大肚區	0.914	0.012	0.013	0.014	0.026	0.021
大里區	0.914	0.012	0.013	0.014	0.026	0.021
大雅區	0.914	0.012	0.013	0.014	0.026	0.021
中 匸	0.914	0.012	0.013	0.014	0.026	0.021
太平區	0.914	0.012	0.013	0.014	0.026	0.021
北 匸	0.914	0.012	0.013	0.014	0.026	0.021
北屯區	0.914	0.012	0.013	0.014	0.026	0.021
外埔區	0.914	0.012	0.013	0.014	0.026	0.021
石岡區	0.914	0.012	0.013	0.014	0.026	0.021
后里區	0.914	0.012	0.013	0.014	0.026	0.021
西 匸	0.914	0.012	0.013	0.014	0.026	0.021
西屯區	0.914	0.012	0.013	0.014	0.026	0.021
沙鹿區	0.914	0.012	0.013	0.014	0.026	0.021
和平區	0.914	0.012	0.013	0.014	0.026	0.021
東 匸	0.914	0.012	0.013	0.014	0.026	0.021
東勢區	0.914	0.012	0.013	0.014	0.026	0.021
南 匸	0.914	0.012	0.013	0.014	0.026	0.021
南屯區	0.914	0.012	0.013	0.014	0.026	0.021
烏日區	0.914	0.012	0.013	0.014	0.026	0.021



神岡區	0.914	0.012	0.013	0.014	0.026	0.021
梧棲區	0.914	0.012	0.013	0.014	0.026	0.021
清水區	0.914	0.012	0.013	0.014	0.026	0.021
新社區	0.914	0.012	0.013	0.014	0.026	0.021
潭子區	0.914	0.012	0.013	0.014	0.026	0.021
龍井區	0.914	0.012	0.013	0.014	0.026	0.021
豐原區	0.914	0.012	0.013	0.014	0.026	0.021
霧峰區	0.914	0.012	0.013	0.014	0.026	0.021

表 30 能源永續性指標權重

	人均能源消耗量	單位 GDP 能源消耗量	單位 GDP 碳排放量	工業固體廢棄物產生量	電氣化比例	科技投資佔 GDP 的百分比
大甲區	0.029	0.123	0.038	0.035	0.318	0.458
大安區	0.029	0.123	0.038	0.035	0.318	0.458
大肚區	0.029	0.123	0.038	0.035	0.318	0.458
大里區	0.029	0.123	0.038	0.035	0.318	0.458
大雅區	0.029	0.123	0.038	0.035	0.318	0.458
中區	0.029	0.123	0.038	0.035	0.318	0.458
太平區	0.029	0.123	0.038	0.035	0.318	0.458
北區	0.029	0.123	0.038	0.035	0.318	0.458
北屯區	0.029	0.123	0.038	0.035	0.318	0.458
外埔區	0.029	0.123	0.038	0.035	0.318	0.458
石岡區	0.029	0.123	0.038	0.035	0.318	0.458

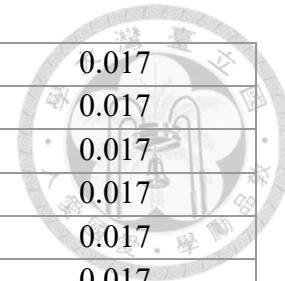


后里區	0.029	0.123	0.038	0.035	0.318	0.458
西 區	0.029	0.123	0.038	0.035	0.318	0.458
西屯區	0.029	0.123	0.038	0.035	0.318	0.458
沙鹿區	0.029	0.123	0.038	0.035	0.318	0.458
和平區	0.029	0.123	0.038	0.035	0.318	0.458
東 區	0.029	0.123	0.038	0.035	0.318	0.458
東勢區	0.029	0.123	0.038	0.035	0.318	0.458
南 區	0.029	0.123	0.038	0.035	0.318	0.458
南屯區	0.029	0.123	0.038	0.035	0.318	0.458
烏日區	0.029	0.123	0.038	0.035	0.318	0.458
神岡區	0.029	0.123	0.038	0.035	0.318	0.458
梧棲區	0.029	0.123	0.038	0.035	0.318	0.458
清水區	0.029	0.123	0.038	0.035	0.318	0.458
新社區	0.029	0.123	0.038	0.035	0.318	0.458
潭子區	0.029	0.123	0.038	0.035	0.318	0.458
龍井區	0.029	0.123	0.038	0.035	0.318	0.458
豐原區	0.029	0.123	0.038	0.035	0.318	0.458
霧峰區	0.029	0.123	0.038	0.035	0.318	0.458



表 31 糧食永續性指標權重

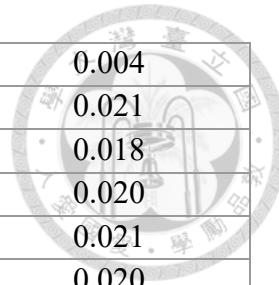
	人均糧食種植面積	糧食種植面積比例	人均糧食生產	單位面積糧食生產量	化肥負荷量	農業產值比重
大甲區	0.352	0.053	0.498	0.027	0.053	0.017
大安區	0.352	0.053	0.498	0.027	0.053	0.017
大肚區	0.352	0.053	0.498	0.027	0.053	0.017
大里區	0.352	0.053	0.498	0.027	0.053	0.017
大雅區	0.352	0.053	0.498	0.027	0.053	0.017
中區	0.352	0.053	0.498	0.027	0.053	0.017
太平區	0.352	0.053	0.498	0.027	0.053	0.017
北區	0.352	0.053	0.498	0.027	0.053	0.017
北屯區	0.352	0.053	0.498	0.027	0.053	0.017
外埔區	0.352	0.053	0.498	0.027	0.053	0.017
石岡區	0.352	0.053	0.498	0.027	0.053	0.017
后里區	0.352	0.053	0.498	0.027	0.053	0.017
西區	0.352	0.053	0.498	0.027	0.053	0.017
西屯區	0.352	0.053	0.498	0.027	0.053	0.017
沙鹿區	0.352	0.053	0.498	0.027	0.053	0.017
和平區	0.352	0.053	0.498	0.027	0.053	0.017
東區	0.352	0.053	0.498	0.027	0.053	0.017
東勢區	0.352	0.053	0.498	0.027	0.053	0.017
南區	0.352	0.053	0.498	0.027	0.053	0.017
南屯區	0.352	0.053	0.498	0.027	0.053	0.017
烏日區	0.352	0.053	0.498	0.027	0.053	0.017



神岡區	0.352	0.053	0.498	0.027	0.053	0.017
梧棲區	0.352	0.053	0.498	0.027	0.053	0.017
清水區	0.352	0.053	0.498	0.027	0.053	0.017
新社區	0.352	0.053	0.498	0.027	0.053	0.017
潭子區	0.352	0.053	0.498	0.027	0.053	0.017
龍井區	0.352	0.053	0.498	0.027	0.053	0.017
豐原區	0.352	0.053	0.498	0.027	0.053	0.017
霧峰區	0.352	0.053	0.498	0.027	0.053	0.017

表 32 水永續性指標的綜合評估值

	人均水資源	人均用水量	單位 GDP 用水量	工業額外產值 用水量	水資源利用率	廢(污)水量
大甲區	0.003	0.012	0.012	0.013	0.018	0.018
大安區	0.006	0.010	0.010	0.012	0.016	0.020
大肚區	0.003	0.012	0.012	0.013	0.020	0.020
大里區	0.001	0.012	0.012	0.012	0.016	0.020
大雅區	0.002	0.012	0.013	0.013	0.020	0.016
中 區	0.000	0.012	0.013	0.011	0.000	0.021
太平區	0.005	0.012	0.012	0.012	0.023	0.020
北 區	0.000	0.012	0.013	0.010	0.006	0.020
北屯區	0.002	0.012	0.013	0.012	0.022	0.021
外埔區	0.006	0.011	0.011	0.012	0.018	0.021
石岡區	0.008	0.011	0.011	0.000	0.023	0.000

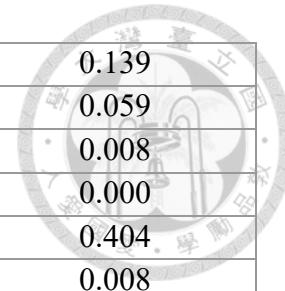


后里區	0.006	0.011	0.013	0.013	0.020	0.004
西 區	0.000	0.012	0.013	0.010	0.006	0.021
西屯區	0.001	0.012	0.013	0.014	0.019	0.018
沙鹿區	0.003	0.012	0.012	0.013	0.021	0.020
和平區	0.914	0.000	0.000	0.014	0.026	0.021
東 區	0.001	0.012	0.013	0.011	0.016	0.020
東勢區	0.018	0.011	0.011	0.008	0.024	0.021
南 區	0.000	0.012	0.013	0.012	0.007	0.021
南屯區	0.001	0.012	0.013	0.013	0.018	0.020
烏日區	0.003	0.012	0.012	0.013	0.020	0.017
神岡區	0.003	0.012	0.012	0.013	0.020	0.021
梧棲區	0.001	0.012	0.013	0.013	0.019	0.019
清水區	0.004	0.012	0.012	0.012	0.020	0.020
新社區	0.022	0.010	0.010	0.010	0.023	0.021
潭子區	0.002	0.012	0.012	0.014	0.017	0.019
龍井區	0.003	0.012	0.012	0.013	0.020	0.008
豐原區	0.002	0.012	0.012	0.012	0.020	0.020
霧峰區	0.010	0.011	0.011	0.013	0.022	0.020



表 33 能源永續性指標的綜合評估值

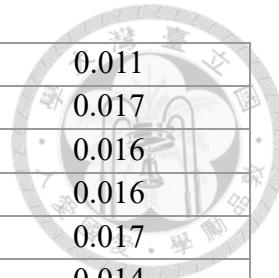
	人均能源消耗量	單位 GDP 能源消耗量	單位 GDP 碳排放量	工業固體廢棄物產生量	電氣化比例	科技投資佔 GDP 的百分比
大甲區	0.025	0.037	0.012	0.024	0.042	0.281
大安區	0.027	0.000	0.015	0.035	0.013	0.006
大肚區	0.026	0.032	0.024	0.028	0.030	0.059
大里區	0.027	0.037	0.025	0.024	0.020	0.074
大雅區	0.009	0.095	0.038	0.009	0.213	0.458
中區	0.026	0.012	0.018	0.035	0.031	0.000
太平區	0.026	0.040	0.026	0.024	0.023	0.025
北區	0.027	0.032	0.024	0.035	0.018	0.000
北屯區	0.028	0.035	0.025	0.035	0.010	0.000
外埔區	0.027	0.019	0.020	0.033	0.015	0.114
石岡區	0.028	0.009	0.017	0.035	0.011	0.002
后里區	0.000	0.123	0.038	0.017	0.318	0.167
西區	0.027	0.028	0.023	0.035	0.022	0.000
西屯區	0.012	0.087	0.036	0.000	0.187	0.297
沙鹿區	0.026	0.036	0.025	0.032	0.027	0.059
和平區	0.027	0.035	0.022	0.035	0.016	0.000
東區	0.027	0.030	0.023	0.033	0.014	0.006
東勢區	0.029	0.008	0.019	0.035	0.000	0.000
南區	0.027	0.041	0.026	0.034	0.017	0.000
南屯區	0.024	0.049	0.015	0.021	0.047	0.139
烏日區	0.025	0.040	0.000	0.029	0.040	0.034



神岡區	0.025	0.042	0.026	0.022	0.042	0.139
梧棲區	0.016	0.071	0.032	0.017	0.141	0.059
清水區	0.027	0.031	0.024	0.032	0.021	0.008
新社區	0.027	0.002	0.016	0.035	0.012	0.000
潭子區	0.023	0.076	0.022	0.024	0.059	0.404
龍井區	0.023	0.036	0.012	0.021	0.062	0.008
豐原區	0.027	0.021	0.022	0.030	0.013	0.021
霧峰區	0.026	0.024	0.022	0.030	0.032	0.066

表 34 糧食永續性指標的綜合評估值

	人均糧食種植面積	糧食種植面積比例	人均糧食生產	單位面積糧食生產量	化肥負荷量	農業產值比重
大甲區	0.012	0.036	0.004	0.009	0.036	0.015
大安區	0.033	0.053	0.010	0.008	0.053	0.011
大肚區	0.006	0.026	0.003	0.011	0.026	0.014
大里區	0.001	0.016	0.000	0.011	0.016	0.012
大雅區	0.003	0.024	0.001	0.008	0.024	0.010
中區	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
太平區	0.003	0.016	0.002	0.011	0.016	0.016
北區	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
北屯區	0.001	0.013	0.001	0.012	0.013	0.017
外埔區	0.020	0.040	0.008	0.009	0.040	0.014
石岡區	0.007	0.029	0.007	0.014	0.029	0.017

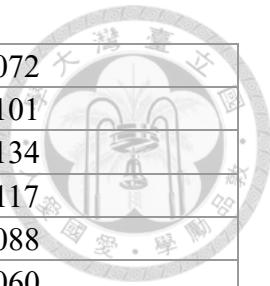


后里區	0.011	0.035	0.006	0.010	0.035	0.011
西 區	0.000	0.000	0.000	0.012	0.000	0.017
西屯區	0.001	0.013	0.000	0.007	0.013	0.016
沙鹿區	0.003	0.028	0.004	0.016	0.028	0.016
和平區	0.352	0.005	0.498	0.027	0.005	0.017
東 區	0.000	0.000	0.000	0.018	0.000	0.014
東勢區	0.017	0.027	0.018	0.019	0.027	0.017
南 區	0.000	0.002	0.000	0.010	0.002	0.017
南屯區	0.001	0.024	0.000	0.005	0.024	0.017
烏日區	0.008	0.027	0.003	0.010	0.027	0.011
神岡區	0.005	0.027	0.003	0.011	0.027	0.015
梧棲區	0.004	0.022	0.001	0.008	0.022	0.015
清水區	0.010	0.030	0.004	0.011	0.030	0.016
新社區	0.022	0.032	0.018	0.013	0.032	0.017
潭子區	0.004	0.042	0.002	0.011	0.042	0.016
龍井區	0.007	0.027	0.002	0.009	0.027	0.016
豐原區	0.001	0.015	0.001	0.012	0.015	0.016
霧峰區	0.017	0.034	0.008	0.009	0.034	0.015



表 35 水、能源、糧食鏈結永續性的綜合評估值

	水	能源	糧食
大甲區	0.076	0.421	0.111
大安區	0.075	0.096	0.168
大肚區	0.081	0.199	0.085
大里區	0.073	0.206	0.057
大雅區	0.077	0.821	0.070
中 化	0.056	0.122	0.000
太平區	0.084	0.165	0.063
北 區	0.061	0.137	0.000
北屯區	0.081	0.132	0.056
外埔區	0.078	0.229	0.131
石岡區	0.054	0.101	0.103
后里區	0.067	0.663	0.108
西 區	0.061	0.135	0.029
西屯區	0.077	0.619	0.051
沙鹿區	0.080	0.205	0.095
和平區	0.975	0.135	0.904
東 區	0.073	0.134	0.032
東勢區	0.092	0.091	0.125
南 化	0.065	0.145	0.031
南屯區	0.078	0.295	0.070
烏日區	0.078	0.167	0.085
神岡區	0.081	0.296	0.088



梧棲區	0.077	0.337	0.072
清水區	0.079	0.142	0.101
新社區	0.096	0.094	0.134
潭子區	0.076	0.608	0.117
龍井區	0.068	0.162	0.088
豐原區	0.079	0.135	0.060
霧峰區	0.087	0.200	0.116