

國立臺灣大學生物資源暨農學院

森林環境暨資源學系

碩士論文

School of Forestry and Resource Conservation

College of Bio-Resources & Agriculture

National Taiwan University

Master Thesis



應用網絡分析於生物炭研究知識圖譜建構之研究

Application of Network Analysis to the Construction of

Biochar Research Knowledge Map

陳建良

Jian-Liang Chen

指導教授：邱祈榮 博士

Advisor: Chyi-Rong Chiou, Ph.D.

中華民國 111 年 7 月

July, 2022

摘要



二氧化碳是導致全球變暖的主要人為溫室氣體，對全球生態系統造成巨大的影響。化石燃料的燃燒是其排放的主要人為來源。生物炭是一種多孔的碳質材料，是在熱化學反應過程中形成的固體材料，並且為一種具有成本效益的綠色吸附劑。研究應用上常施作於，土壤管理、空氣汙染之控制、固定碳量、農業廢棄物、水質淨化等環境管理相關之能源生產的功效。近年來，人們對生物炭生產和利用的興趣日益濃厚。

本研究使用 Web of Science 資料庫蒐集生物炭的相關文獻，將蒐集到的 820 篇核心文獻作為本研究的研究基礎，接續進行文獻計量分析與社會網絡分析。透過 VOSviewer 建立關鍵字文獻計量圖譜，接續透過 UCINET 對關鍵字做各中心性的社會網絡分析，亦繪製網絡圖譜。找出，1.生物炭研究之關鍵字，並分類重要研究議題；2.觀察生物炭的發展趨勢；3.作者共被引與期刊共被引間生物炭研究的重要性；4.各個國家生物炭研究的主軸。

分析結果顯示，生物炭的研究領域中，計有三大範疇，分別為性質範疇、活動範疇、實體範疇，得知生物炭的備製從料源的收集到燒製的方法最後到產出後帶來的效益，是非常多樣化的。高共被引作者關係中，Yong Sik Ok、Bin Gao、Guangming Zeng，三位作者是生物炭不同研究主題的關鍵人物，也代表著在生物炭這個領域中各有其獨特觀點。期刊部分，Bioresource Technology、Chemosphere、Chemical Engineering Journal 是前三大共被引的科學期刊，代表這三個期刊在此領域中與很多文獻有著密切的關連，也代表在生物炭領域中有著強大的影響力。而各國的研究議題經分析顯示為相似的結果，但可看出中國的研究篇幅最多，主題也最為廣泛，其餘美國、南韓與澳洲則有各自不同關注的焦點，我國雖篇幅較少且主題上無明確的走向，但在通盤瞭解後，生物炭未來研究上有著十足的潛力。

關鍵字：生物炭、文獻計量分析法、社會網絡分析法、網絡圖譜、VOSviewer、UCINET

Abstract

Carbon dioxide is a major anthropogenic greenhouse gas that contributes to global warming and has a huge impact on the global ecosystem. The combustion of fossil fuels is the main anthropogenic source of its emissions. Biochar is a porous carbonaceous material that is formed as a solid material during a thermochemical reaction and is a cost-effective green adsorbent. It is often used in research applications such as soil management, carbon capture, air pollution control, agricultural waste management, water purification and energy generation related to environmental management. In recent years, there has been growing interest in producing and using biochar.

In this research we have collected biochar related literature using the Web of Science database. The 820 basic documents collected were used as a foundation for this research, followed by bibliometric analysis and social network analysis. keyword bibliometric atlas was established through VOSviewer, followed by UCINET to do a central social network analysis of keywords, and network mapping was also drawn.

Identify, 1. The keywords for biochar research were identified and categorized into important research issues; 2. The development trend of biochar was observed; 3. The importance of biochar research between author co-citations and journal co-citations; 4. The main axes of biochar research in each country. The analysis shows that there are three categories of biochar research, which are characteristic, activity and substance. and which indicate that the preparation of biochar is very diverse, from the collection of the material source to the method of burning and finally to the benefits brought by the production. Among the highly cited authors, Yong Sik Ok, Bin Gao, and Guangming Zeng. The three authors are key figures in different research topics of biochar, and each represents a unique perspective in the field of biochar. In terms of journals, Bioresource Technology, Chemosphere, and Chemical Engineering Journal are the top three co-cited scientific journals, which means that these three journals are closely related to many literatures in this field and have a strong influence in the field of biochar. The analysis of research topics in various countries shows similar results, but it can be seen that China's research is the largest and the topic is the widest. The rest of the United States, South Korea and Australia have their own different focus of attention, although our country is small and there is no clear trend in the theme, but after a comprehensive understanding, biochar has full potential for future research.

Keywords : Biochar, literature measurement analysis, social network analysis, network mapping, VOSviewer, UCINET

目錄



摘要.....	i
Abstract.....	ii
圖目錄.....	v
表目錄.....	vi
第一章 緒論.....	1
第一節 研究背景與動機.....	1
第二節 研究目的與問題.....	4
第三節 研究步驟與流程.....	5
第二章 文獻探討.....	6
第一節 生物炭的發展、潛力與應用.....	6
第二節 文獻計量分析法.....	9
第三節 社會網絡分析法.....	13
第三章 研究方法與設計.....	18
第一節 研究方法.....	18
第二節 研究設計.....	19
第四章 研究結果.....	25
第一節 基本資料建立.....	25
第二節 關鍵字文獻計量圖譜分析.....	27
第三節 作者與期刊共被引文獻計量圖譜分析.....	47
第四節 國家網絡研究分析.....	51
第五章 研究結論.....	67
第一節 研究結論.....	67
第二節 研究貢獻.....	69
第三節 研究限制與未來研究方向.....	69

參考文獻

71



圖目錄



圖 1 本研究以 Web of Science 資料庫搜尋關鍵字 “biochar” 結果.....	3
圖 2 研究流程圖.....	5
圖 3 Web of Science 蒐尋關鍵字”biochar”之文獻數量成長圖.....	7
圖 4 研究架構圖.....	18
圖 5 Web of Science 之“biochar”核心文獻搜索結果.....	19
圖 6 生物炭文獻資料庫內容架構圖.....	22
圖 7 生物炭關鍵字網絡可視化圖譜.....	28
圖 8 生物炭研究關鍵詞密度圖譜.....	35
圖 9 生物炭 2012–2015 關鍵字網絡圖.....	40
圖 10 生物炭 2016–2018 關鍵字網絡圖.....	41
圖 11 生物炭 2019–2021 關鍵字網絡圖.....	43
圖 12 生物炭製成方法時間疊加圖.....	44
圖 13 生物炭研究共被引作者關係網絡圖.....	47
圖 14 生物炭研究共被引期刊關係網絡圖.....	49
圖 15 中國關鍵字之程度中心性網絡圖.....	53
圖 16 美國關鍵字之程度中心性網絡.....	56
圖 17 南韓關鍵字之程度中心性網絡.....	59
圖 18 澳洲關鍵字之程度中心性網絡.....	62
圖 19 臺灣關鍵字之程度中心性網絡.....	65

表目錄



表 1	文獻計量學屬性分類表.....	10
表 2	文獻計量學之應用議題.....	12
表 3	社會網絡分析之應用議題.....	17
表 4	前 10 篇生物炭之文獻引用次數	20
表 5	各洲文獻發表數量及百分比	25
表 6	高被引之生物炭文獻各國家數量及排名	26
表 7	生物炭關鍵字群集分類.....	29
表 8	生物炭研究主題類別勘探表	31
表 9	國內生物炭研究共詞頻率之關鍵詞排序.....	36
表 10	2012 – 2015 關鍵字出現頻率表	40
表 11	2016 – 2018 關鍵字出現頻率表	42
表 12	2019 – 2021 關鍵字出現頻率表	43
表 13	生物炭製成方法平均起始年份	45
表 14	共被引作者集群主題分類表	48
表 15	共被引作者集群主題分類表	50
表 16	中國關鍵字網絡分析表.....	51
表 17	美國關鍵字網絡分析表.....	54
表 18	南韓關鍵字網絡分析表.....	57
表 19	澳洲關鍵字網絡分析表.....	60
表 20	臺灣關鍵字網絡分析表.....	63
表 21	各國主要研究之主題與最大集群	66

第一章 緒論



本章總共分為三節，第一節將說明研究背景與動機；第二節提出研究目的與問題；第三節為圖示研究步驟與流程。

第一節 研究背景與動機

在過去幾十年人類對地球所造成的影響，漸漸地積累並往不可逆的方向前進。尤其是在工業革命後，溫室氣體排放量不斷的增加，使得大氣圈內形成明顯的溫室效應，從科學證據來看，顯示出地表溫度在過去兩百年期間確實呈現增溫的趨勢，尤其是近三十年的升溫走向更為顯著 (Levin, 2011)，從而導致全球陸域與海洋溫度以驚人的趨勢持續升溫，此現象稱之為全球暖化。全球的暖化及氣候變遷快速的轉變，主因是由溫室氣體的排放所引起，這種排放來源為自然系統與人類活動。自然系統包括森林火災、地震、海洋、永凍土、濕地、泥火山及火山 (Yue & Gao, 2018)，但最大的排放來源還是人類長期的活動與發展，而主因與能源的生產有關，例如用於熱能和電力生產的化石燃料與消耗，工業生產運輸活動以及森林資源的開發等，並與土地使用與土地利用變遷相關 (Edenhofer et al., 2014)。

氣候變遷作為本世紀最緊迫的挑戰之一，可持續性的發展成為近年來全球研究和政治討論中主要的關鍵字 (Garud & Gehman, 2012；Markard et al., 2012)，其中以自然為本的解決方案 (Nature based Solutions) 可能將成為戰略上成功的關鍵，根據國際自然保育聯盟 (International Union for Conservation of Nature, IUCN) 提出並定義：「可有效、能調適的對應社會挑戰，同時提供人類福祉和生物多樣性效益，為永續管理和恢復自然或改造的生態系統的保護行動」。為了成功實施此解決方案，需要深入了解自然的功能與過程。其中森林能提供的除了造林與再造林外，避免毀林和薪材伐採、保護和修復紅樹林都被視

為基於自然的、減緩氣候變化的有效方案。而在森林的經營管理上，林木的疏伐不乏產生許多的農業廢棄物如稍頭、大枝、修枝材等，經厭氧加工熱裂解後形成的生物炭亦為自然為本的解決方案中固碳的重要元素。

生物炭 (biochar) 根據國際生物炭倡議組織 (International Biochar Initiative, IBI) 的定義，生物炭可應用的範圍包含燃料、土壤改良劑及土壤碳匯資材等。在外觀上類似一般燃燒所產生的焦炭，原料通常由木材、樹葉、稻穀、菱角殼等有機物質，使用包括熱裂解、氣化和水熱炭化在內的碳化所產生的固態物質。當這些物質具有目的的使用在農業土壤以及環境保護上，即可稱為生物炭。在農業領域方面，常見應用於改善土壤性質、增加作物產量等功用 (Lehmann & Joseph, 2009)。而歷史上早在千年前哥倫布時代已有發現亞馬遜河流域的原住民們在土壤中有相似炭品使用的紀錄，其農業活動後所產生之亞馬遜黑土或稱黑土 (Terra Preta) 使得當地的農作物產量高於其他產地，其原因即是使用燃燒不完全後所產生的黑炭 (carbon black) 加入土壤中，黑炭具豐富的氮、磷、鉀和鈣的營養成分，且多環芳香結構的特性也使得亞馬遜黑土穩定的在環境中留存幾世紀 (Glaser et al., 2001)。與生物炭有著異曲同工之妙的關係，而近期生物炭獲得了相當大的認可，除了公認為一種可行的碳捕捉和永久儲存之方式外，更被肯定是有前途的負碳排 (Carbon Negative) 技術之一，又如法國農業生產暨林業部在 COP21 的周邊會議提倡「千分之四倡議 (four per thousand or four per mil initiative)」，其主張藉適當的農業經營增加土壤有機物，加強土壤碳吸存，而生物炭的施加，藉其特性亦能改善劣化土壤的功能。

文獻計量分析 (citation analysis) 與社會網絡分析 (social network analysis) 皆是針對文獻引用型態的系統性網絡研究分析法，透過書目資訊的量化評估，協助瞭解學科知識的學術生產活動及成長的歷程，並掌握未來研究議題的發展趨勢 (Bornmann & Mutz, 2015)。而在文獻計量分析的應用上功能甚廣，研究對象層面可以是國家地區 (Ergul, Ardahan, Temel, & Yildirim, 2010)、學術機構 (Kim &

Kim, 2000)、作者間共同引用的型態等。後期可以針對以上各個層面內互相比較，例如探討不同地區的學術發表產量 (Zhang et al., 2016) 或某一期刊學術發表的長期趨勢 (Yang et al., 2009)。

綜合上述，生物炭在過去十年中，儼然成為許多研究的主題。截止至 2022 年 3 月 31 日，在文獻資料庫 Web of Science 上有 21,908 筆有關於生物炭的文獻 (圖 1)。然，在文獻的研究議題上、國家與學者的關注焦點，知識方面還有很大的差距，為求洞悉生物炭研究發展的整體樣貌。因此，本研究將應用社會網絡分析與文獻計量分析方法，以「生物炭」為主題，於 Web of Science 期刊論文資料庫進行檢索，建構研究所需之文獻計量資料，再運用 VOSviewer、UCINET 軟體將全球生物炭關鍵研究成果製成可視化網絡。探討歷年來發表之研究重點主題項目。

The screenshot shows the Web of Science search results for the keyword "biochar". The interface is in Chinese. At the top, it displays "Web of Science 核心合輯中有 21,908 個結果" (Web of Science Core Collection has 21,908 results). Below this, there are search filters and a list of results. The first result is "Development of the straw biochar returning concept in China" by Meng, J.; He, T.; Chen, W.F., published in BIOCHAR 1 (2), pp.139-149, Jun 1 2019. It has 10 citations and 94 references. The second result is "Past, present, and future of biochar" by Chen, W.F.; Meng, J. (J.); Zhang, W.M., published in BIOCHAR 1 (1), pp.75-87, Mar 1 2019. It has 102 citations and 151 references. The interface includes a sidebar with filters for document types (e.g., Highly Cited, Review Articles) and publication years (2022, 2021, 2020).

圖 1 本研究以 Web of Science 資料庫搜尋關鍵字“biochar”結果

第二節 研究目的與問題



由研究背景動機可知，生物炭之於環境提供了多樣化的功能，並且在實務上與學術上皆有高度的關注與引用。在 Web of Science 文獻資料庫中，已發表之 2 萬 1 千篇有餘的生物炭相關文獻。然而，在眾多的期刊論文中，究竟包含著哪些研究領域？不同國家的學者是否有不同的關注重點？隨著時間的推移生物炭研究經過了哪些轉變？種種疑問必需要透過資料庫的檢索與分析，並做進一步的探討才能得到答案。因此，本研究希望透過文獻計量與社會網絡分析法，建構生物炭相關文獻之間精確的可視化圖譜，快速掌握生物炭議題的發展，希冀能提供各界研究者更完整了解生物炭研究主題間之脈動，以補充知識缺口，並提供後續研究更清晰的系統性應用參考。據此擬定主要探討問題如下：

1. 統整生物炭研究之關鍵字，並透過網絡分析，找出並分類重要研究議題。
2. 觀察生物炭研究議題的發展趨勢。
3. 探究作者共被引與期刊共被引之間生物炭研究的重要性。
4. 探究各個國家生物炭研究的主軸。

第三節 研究步驟與流程



本研究目的係以文獻計量分析方法與社會網絡分析法，進行生物炭主題領域發展之探討，並判讀其呈現之特性。研究流程可分以為六個階段，首先是確定研究之主題，並訂定研究的問題與方向，然後進行第二章的相關文獻之蒐集與整理，接著進行第三章的研究方法設計與建立研究架構，其中包含分析方法之定義與軟體介紹，再來為蒐集及整理資料，建立第四章的所需之資料庫，接著繪製文獻計量分析成果圖譜，最後為結果探討與提出研究貢獻、結論與建議。本研究之研究流程如圖 2 所示：

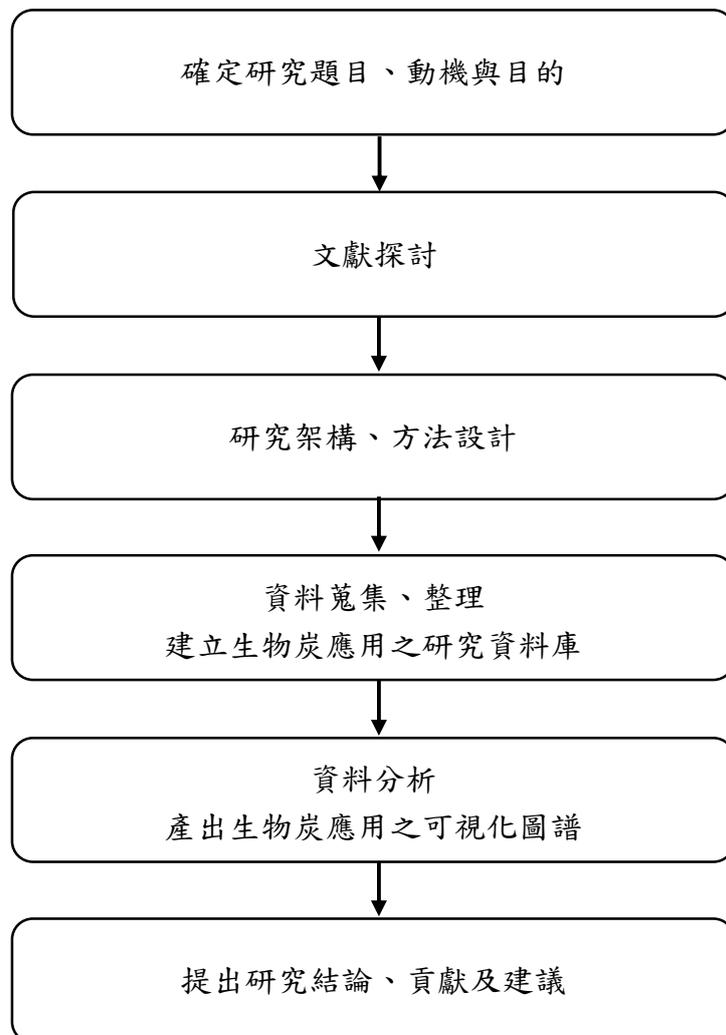


圖 2 研究流程圖

第二章 文獻探討



本章節將針對生物炭領域的發展、潛力及相關研究；文獻計量法領域的發展、及文獻計量法之應用；社會網絡分析法、社會網絡分析指標以及社會網絡分析之應用進行國內、外之相關文獻回顧及探討。

第一節 生物炭的發展、潛力與應用

二氧化碳為致使全球暖化之主要人為溫室氣體，對全球生態系統造成巨大的影響。化石燃料的燃燒是二氧化碳排放的主要人為來源。生物炭是一種多孔的碳質材料，通過有機質在缺氧條件下的熱化學轉化而產生，正在成為一種具有成本效益的綠色吸附劑，通過碳捕捉的特性將二氧化碳鎖在土壤內數百年。生物炭的依據生物質的來源、生物炭生產的方法、如何將其適性利用，成為近年不同的物理化學過程對其進行設計與改性的研究趨勢，後續並合成生物炭複合材料以提高溫室氣體與污染物的吸附能力，已引起了科學界的極大興趣。

一、生物炭的發展

生物炭被人類使用的歷史很長。隨著人們對生物炭的廣泛關注和了解，越來越多的研究人員試圖對生物炭的定義進行統一。在早期作為炭煤改良土壤以進行肥力管理的做法，可以在非洲、亞洲，尤其是亞馬遜盆地等發現。生物炭中，具有豐富的氮、磷、鉀和鈣的營養成分，且多環芳香結構的特性也使得其能穩定的在環境中留存幾世紀 (Glaser et al., 2001)。而生物炭具有多孔性、高 pH 值等特性，以及來自原始枝材的營養成分，使其施加於土壤後能夠影響土壤物化性質及土壤微生物族群的改變，進而影響地上部的作物及林木之生長

(Luo et al., 2016; Noyce et al., 2015; Sackett et al., 2015; Thomas & Gale, 2015)。原則上，生物炭可以由任何類型的生物質原料所製成，如稻稈、木材、淤泥、糞便、廚餘等。但不同的生產條件如，熱裂解、氣化、水熱碳化等，呈

現不同的類型的生物炭，更甚產生出不同的利用與效應，如吸附作用、催化作用、土壤改良、堆肥添加等。



二、生物炭的潛力與應用

在過去近十年中，生物炭已經成為許多研究的主題。然而到目前為止，在知識方面，不同地區與環境還有著很大的差距。生物炭的研究和實施的技術在現今還算處於早期發展階段，人們對生物炭作為一種解決農業和環境問題的多方面解決方案的興趣亦正在快速增加當中。如下圖 3 文獻數量成長圖所示：

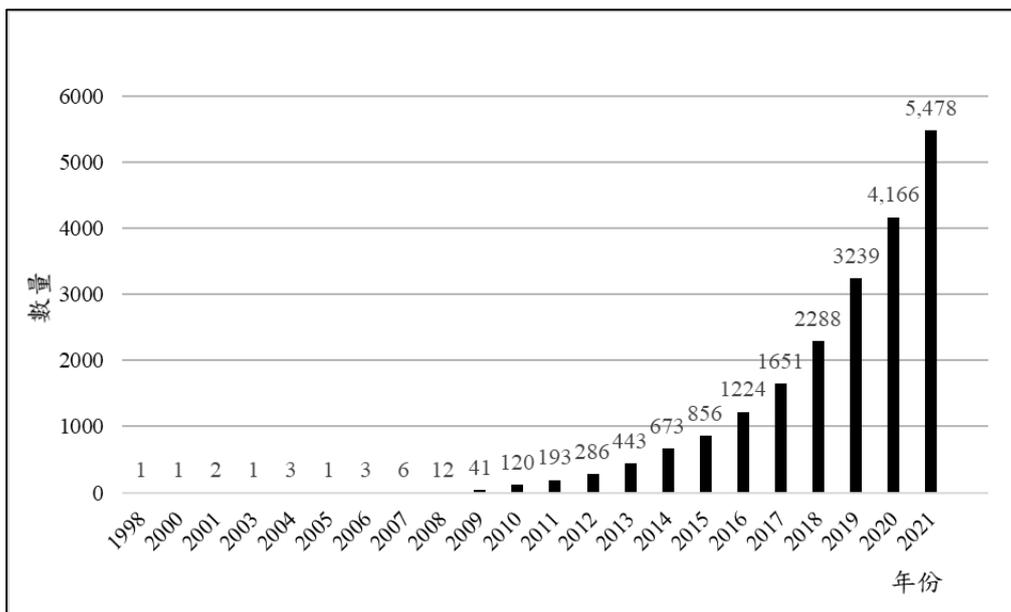


圖 3 Web of Science 蒐尋關鍵字”biochar”之文獻數量成長圖

在生物炭元素組成中，具有豐富的有機碳和礦物質利於增加土壤有機碳含量（Zwieten et al., 2010；Lehmann et al., 2006；Steiner et al., 2008）和土壤礦物含量（Zwieten et al., 2010）。此外，生物炭的高孔隙率也大大改善了土壤的保水能力（Glaser et al., 2002；Benjamin et al., 2019）。使得在農田的經營管理上，對土壤微觀生態環境產生直接或間接影響（Chen et al., 2013）。如生物炭的鹼性成分，支持其用作酸性土壤的土壤改良劑，並改善土壤養分的利用率（Novak et al., 2009；Masulili et al., 2010；Muhammad et al., 2018）。生物炭還可以作為控釋肥料和微生物連接的載體，由於生物炭具有延緩養分在土壤中釋放的能力，減少浸出和固定損失，提高養分利用效率，因此可以應用於生產生物炭之複合

肥、有機肥或生物肥料等。因此，當施用於中低肥力或退化的土壤時，比施用於肥沃或健康的土壤更有效 (El-Naggar et al., 2019)。

在提高動物生長性能上，生物炭可以改善動物體內營養物質的消化和代謝，從而提高動物的生長性能。例如，在飼料中增加生物炭可以提高尼羅羅非魚肌肉中的蛋白質水平 (Boonanuntanasarn et al., 2014)；在飼料中應用 2% 的生物炭可以顯著提高鱈魚的生長速度，並減少氮氣的排放 (Quaiyum et al., 2014)；在雞飼料中補充小麥稈生物炭可減少其腹部脂肪的沉積，降低血清中總膽固醇和三酸甘油酯水平，並在一定程度上改善肉雞的生長性能 (Fu et al., 2015)。在火雞 (Majewska et al., 2009) 和山羊 (Villalba et al., 2002) 中也發現了類似的結果。

生物炭的碳框架很穩定，不易分解，它可以被土壤固定，並直接轉化為土壤中的碳匯 (Cao & Pawłowski, 2013)。生物炭對土壤中的碳和氮的轉化過程有深刻的作用。由於離子間的引力作用，生物炭的應用減少了土壤二氧化碳的排放 (Zimmerman et al., 2011；Chintala et al., 2014；Cross & Sohi, 2011；Sagrilo et al., 2015)，二氧化氮的排放也通過各種機制大大減少 (Jia et al., 2012；Renner, 2007；Cayuela et al., 2014)。

展望現今對於生物炭的基本特徵的描述還沒有建立完善的標準。此外，大部分的研究只集中在確定原料和碳化過程對生物炭特性的影響。在確定土壤中生物炭的質量、數量和微觀方面的方法還是有限的。生物炭對土壤、作物和環境的影響研究大多主要是在短期和模擬實驗中進行，而不是在長期的田野間進行試驗研究。故到目前為止，在設計生物炭改良和生物炭肥料的研究領域還沒有取得更重大突破。

第二節 文獻計量分析法



研究科學文獻是瞭解過去研究、當前知識和預測生物炭研究未來軌跡的第一步。在這方面，文獻計量分析和社會網絡分析的整合已被證明是定量評估科學文獻模式和趨勢中有用的工具，它可以系統性地回顧特定科學領域的相關研究歷史，詳細分析研究、狀況與確定研究熱點，在重要國家；機構學者之間建立國際間合作網絡關係，並探索特定領域的未來研究方向。(Cordeiro, 2019; Otte & Rousseau, 2002; Picone et al., 2021; Saggiomo et al., 2020; Sharifi, 2021)。

一、文獻計量學理論

文獻計量學 (Bibliometrics) 亦稱文獻計量法或書目計量學，在圖書館學及資訊科學計量化的發展過程中，早期曾以統計書目、科學計量學、資訊計量學、書目計量學來稱之。文獻計量法是藉由計算、比較和分析來探討研究文獻的數量關係、變化規律、分佈結構等層面。由英國的學者 Pritchard (1969) 所提出，他將文獻計量法定義為利用數學與統計的方法，應用於書籍及其他傳播媒介中。何光國 (1994) 也曾指出，文獻計量可泛指利用數學、統計學、和邏輯學的理論和方法，對各類型文獻的本質和結構，做數量、品質、和運用上的研究與分析者，通稱為文獻計量學並已成為一門獨立的學科。文獻計量學的研究範圍，根據探討議題的不同，歸納後可分為三種屬性，如下表 1 文獻計量學屬性分類表所示：

表 1 文獻計量學屬性分類表

屬性	研究議題	描述
數量 分析	布萊德福 經驗法則	惟科學期刊按照其刊登該學科專業論文數量的多少，依照遞減的順序排列，即可將該期刊分類為此項專業學科的核心內容、相關內容與非相關內容。
	洛特卡 經驗法則	本經驗法則揭示文獻作者出現頻率與文獻數量之間的關係，並說明該學科頻率分不規律的生產率。
	普萊斯 經驗法則	利用邏輯方法將統計資料作為對向，即可預測文獻的出版與累積。
	齊普夫 經驗法則	普夫經驗法則說明，惟關鍵字出現的頻率先由大到小的順序排列，而每個關鍵詞出現的頻率與其名次的常數會出現簡單之反比關係。
品質 分析	文獻成長	文獻成長雖為必然趨勢，但事實上文獻並非以固定模式成長。會依知識內涵的變化與演進，文獻呈現不同成長模式。
	引文研究	說明數理統計及概率論兩者對於文獻的被引用率進行結果分析。
	文獻老化	文獻老化表示，隨著時間的前進，文獻內容將會漸漸失去其固有價值，使用量的漸少，清楚說明在重要議題中文獻的老化之表徵。
應用 分析	學術傳播	作者經由正式的與非正式的資源管道，引用並傳播學術的資訊，即可稱為學術的傳播。
	學術評價	說明客觀地去描述學術研究其成果的外顯特徵與學術成果之間的聯結形式，進而描寫出學術研究的形式化圖像，再而達到目的導向之學術評估。

文獻計量可以通過分析文獻的各個欄位，像是引文、相關主題、關鍵字、出版期刊 (Thanuskodi, 2010; Tsay, 2011; Wan et al., 2009)，找出一段時間內大量文獻所呈現的訊息，並可提供對學術文獻的定量見解，是瞭解趨勢常用的研究分析方法之一 (Benckendorff & Zehrer, 2013)。文獻計量分析採用了各種數據分析方法，包括最常用的直接引用 (direct citation) 或又稱為互相引用 (inter-citation) 之外，還有文獻耦合 (bibliographic coupling)、共被引 (co-citation)、共詞分析 (co-word analysis) 等。而現今為了顯示動態科學知識體系中的知識結構，由文獻計量分析而衍生的文獻計量圖譜成為了文獻計量學領域的重要研

究課題 (Börner, Chen, & Boyack, 2003)。

本研究中的文獻計量法是指使用可計算的統計方法，進行下列分析，包含：(1) 分析科學研究記錄，確定重要研究議題；(2) 定量評估最具影響力的關鍵字；(3) 確定由不同組織及國家所研究議題間之相互關係；(4) 比較各國研究議題的涵蓋面；(5) 建立同義詞組以及相關概念；(6) 測量關鍵字的頻率。最後，透過因素分析創建概念圖（關鍵字、同義詞和相關概念），創建協作網路地圖（國家或組織），對關鍵字、同義詞和相關概念進行分類，然後將這些分組與國家或組織進行關聯。

二、文獻計量之應用

一直以來，文獻計量為學科知識發展中進行分析運行的重要利器，透過書目資料進行資訊分析，加以歸納並且能夠預測未來文獻數量增加的路徑，進而提供研究者們能夠預先掌握研究學科知識的脈動。因此，運用文獻計量法的研究與其應用領域非常廣泛 (De Bellis, 2009)。文獻計量可以應用於環境、醫學、生物材料、商業與設計相關等議題，此方法為全球各領域學者常用的文獻趨勢研究方法之一。如下表 2 文獻計量學之應用議題所示：

表 2 文獻計量學之應用議題

學者 (年代)	應用議題	內容
Jiang et al. (2019)	環境	使用 Web of Science 搜尋 “open burning of straw” 或 “agricultural waste burning” 或者 “stubble burning” 及 “straw burning” 與 “crop residue burning”，來搜索主題中包含這些詞的所有出版物（標題、關鍵詞和摘要）共有 813 篇文獻符合入選標準。
Chen et al. (2020)	醫學	通過 Web of Science 和 ORIGIN 直接解釋和繪製出版物的定量分析。通過 VOSviewer 進行作者、國家和關鍵字之間的共現和協作分析。通過 CiteSpace 檢測到關鍵字增長。
Hou et al. (2019)	生物材料	論文數據從 Web of Science 核心合集中檢索相關論文 3839 篇，然後通過文獻計量和 CiteSpace 可視化分析進行分析。
Bretas & Alon (2021)	商業	使用 VOSviewer 分析作者關鍵詞的共現來探索該領域的主題結構。並利用 R 語言創建概念專題圖，說明研究流如何根據中心性和密度進行定位。
王瑞良、許子凡 (2019)	設計	以華藝學術期刊資料庫歷年來收錄之 197 篇包裝相關期刊為分析來源，經由 VOS 知識圖譜軟體以數據統計和共現分析等方式進行文獻計量分析，並輔以代表性期刊論文之文獻評析，對於包裝學術研究之發展歷程、主題分佈及新興議題予以完整探討。

由上表可見，計量分析提供了一種有價值的分析技術，並廣泛應用於繪製各項學科特定研究主題相關之現有文獻。

第三節 社會網絡分析法



社會網絡分析法惟一門跨學科的研究方法，針對人、團體、組織、動物、計算機或其他資訊與知識之間的關係。網絡中的節點是人和團體，而鏈接顯示節點之間的關係。係主要由社會心理學的社會學家和研究人員所開發，並與數學、統計和計算合作進一步發展，從而導致形式分析技術的快速發展，使其成為其他學科經常使用的方法之一（Cantner & Graf, 2006）。本節將針對社會網絡分析法的理論、社會網絡的構成要素、社會網絡的分析指標以及社會網絡分析法之應用做詳細的探討。

一、社會網絡分析理論

社會網絡分析（Social network analysis, SNA）起源於 1930 年代，由社會心理學家 Jacob Levy Moreno 所創建，最初是社會學家用於探索群體與個人之間的關係（Scott, 1991）。直至 Wasserman 與 Faust（1994）對社會網絡提出了較為完整的概念，社會網絡數據可以看作是一種社會關係系統以一組節點及其社交關係為特徵。節點屬性變量或多個形式的信息關係可以是社會關係系統的一部分。另外，又將社會網絡定義為特定的行動者與其之間的連結關係，其中理論概念應包含四個核心論點：

- （一）行動者與其行動內容之中有著緊密之相互依存的關係，非為獨立的自主存在。
- （二）行動者之間存在著移轉或是流通的管道，其為與資源的聯繫關係。
- （三）網絡結構關係的存在可為個別之行動者帶來機會，但也因此限制，也可能帶來行動上的阻礙。
- （四）結構的環境是為行動者們之間持續性的一種模式關係。

在此四項重要議題內容中，Wasserman 和 Faust 說明進行網絡分析時，需要探究這些行動者間的關係結構，方能理解行動者間的關係結構為何。簡言

之，社會網絡分析為三個最主要構成要素，分別為行動者（actors）、行動者之間的關聯性（ties）及由行動者彼此之間的關係所構成的網絡結構（蘇國賢，1997；方世榮等，2005）。



二、社會網絡的構成要素

社會網絡分析可以將複雜的社會關係，簡單化為具體的「節點」與「連結」，以精確的數據定義節點間的互動，藉以進行量化分析。而根據 Mitchell (1969) 提出社會網絡分析的三要素，分別為行為者（節點）、關係和連結。

（一）行動者（actors）：

行動者，亦稱節點，可為個人或組織團體。

（二）關係（relationship）：

由行動者間連結關係的產生，可能作為互動、支配與訊息傳遞，並可以具有方向性與強度關係，亦或是毫無關係亦或者是多重關係。

（三）連結：(ties)：

說明當行動者及他者行動者建立連結時，需要經由某種路徑創建彼此的關係。進一步以數值表現，又能夠分為強連結（Strong Ties）與弱連結（Weak Ties），將連結賦予大小不一的數值（weight），數值越大代表連結越強，亦即兩結點間的關係越密切，有些網絡圖會以較粗或較深的線來表示其連結強度較強。

三、社會網絡的分析指標

根據 Freeman (1979) 所定義，將中心性區分為三種衡量指標，分別為程度中心性、中介中心性、以及接近中心性。

(一) 程度中心性 (Degree centrality)

惟最容易計算的衡量標準。指一節點與其他節點直接連結的個數，又稱為局部中心性 (Local centrality)，一個節點的節點度越大，意味著該節點的程度中心性越高，若程度中心性越高，表明其餘社會網絡的圖譜中有著更直接的關聯性。表示該作者 (期刊/關鍵字) 在網絡中具有影響力。

$$C_D(i) = \frac{\sum_j^n m_{ij}}{n-1} \quad (\text{式 1})$$

式子 (1) 中的 n 為網絡中所有節點之總量，當 $m_{ij} \neq 0$ 時，表示 i 與 j 有連結的關係。而當 $m_{ij} = 0$ 時，說明 i 與 j 間沒有連結的存在。而後，將網絡中與 i 點有連結之行動者加總起來再去除以 $n-1$ 即可得出結果。

(二) 中介中心性 (Betweenness centrality)

權衡某一點在於其他任兩節點徑途上的重要程度，也就是衡量在其他任意兩個節點之間，某一節點是否處於最短路徑的中介位置。當中介中心性的值越高時，表示該節點扮演著溝通與橋梁的作用，代表越多的節點與此節點密不可分，則該節點具有一定的重要性。本研究將對作者欄位 (期刊/關鍵字) 運行計算，得出中介中心性越高之關鍵詞，說明作者 (期刊/關鍵字) 於網絡圖譜中扮演著重要的關鍵字詞，為節點之間最短的路徑，可以幫助不同作者 (期刊/關鍵字) 間的合作與知識流動。

$$b_{ijm} = \frac{g_{ijm}}{g_{jm}} \quad (\text{式 2})$$

$$C_B(i) = \frac{\sum_j^n \sum_m^n b_{ijm}}{(n-1)(n-2)} \quad (\text{式 3})$$

公式 (2) 中的 g_{ijm} 為節點 i 連結著 j 和 m ，式子 (3) 的分子式為式 (2)，得網絡中任意兩個節點最短之路徑距離，得出計算數之加總，分母為



關係數量之可能的存在。

(三) 接近中心性 (Closeness centrality)

測量節點與其他節點的接近緊密程度，使用節點之間的最短路徑長度來權衡節點之接近中心性，又稱為整體中心性 (Global centrality)。但倘若接近中心性數值越高，說明其他的節點可通過較少之節點的連結到原節點，節點間連接出接近中心性值越高，表示原節點可透過較少節點的轉接連通至其他節點。本研究將對作者欄位 (期刊/關鍵字) 運行計算，計算結果得出，接近中心性數值越高者，表示該作者 (期刊/關鍵字) 距離其他節點的距離越近，說明於該學術範疇中有著重要的地位並具有相當大的影響力。

$$C_{C(i)} = \frac{n-1}{\sum_j^n d_{ij}} \quad (\text{式 4})$$

式 (4) 中的 d_{ij} 表示節點 i 到 j 的最短距離，其數據結果加總越少，說明其離中心越近，式子將總和放在分母的位置， $n-1$ 則放於分子處。得出，計算之值越大，越具有接近中心性的表現。

四、社會網絡分析法之應用

社會網絡分析的應用層面非常廣泛，有許多不同研究背景的學者皆使用社會網絡分析作為方法，並建構知識網絡結構。社會網絡分析法通常透過訪談、觀察法、實驗及蒐集問卷來得到社會網絡資料，這些程序確定了關係某些項目，例如關鍵字共同的次數，引文和作者在文獻中被同時提及特定的研究領域。該方法主要用於了解底層文章之間相互關係的框架 (Ding et al., 2001)。不同社會網絡分析之應用議題如下表 3 社會網絡分析之應用議題所示：

表 3 社會網絡分析之應用議題

學者 (年代)	應用議題	內容
Shaharudin et al. (2019)	環境科學	運用社會網絡分析探討低碳供應鏈管理文獻過去、現在和未來的研究趨勢，並針對商業和管理領域加以分析，有助於提供學者未來的研究趨勢。
Mostafa (2020)	宗教學	運用社會網絡分析於清真食品的知識網絡，並採用視覺化技術來探索該領域的基本文獻計量與科學計量學概況，找出其影響力的作者、核心期刊、代表性參考文獻、合作模式、研究熱點與新興趨勢等，並發掘不同參與者之間如何交換信息。
王光旭 (2013)	政治學	運用社會網絡分析進行運算於健保的政策治理，並呈現出程度中心性指數且圖像化的表現，處理過去面對集體決策研究時困難之處。
林俊成、王培蓉、詹為巽 (2018)	林學	透過社會網絡分析指標探討近年來臺灣林學相關研究之重點主題與結構
邱英浩、劉陳傳、洪瑞陽 (2020)	工程學	以網絡分析的方式切入，探討跨領域治理及權力關係，社會網絡分析法則運用於行動者其權力關係，進一步找出決策過程中遇到的問題。

第三章 研究方法與設計



本章研究方法與設計共分為兩節，第一節為說明研究方法，並擬定研究架構圖；第二節為研究設計，先說明資料蒐集以及資料處理，並敘述如何使用分析軟體建立所需之圖表與相關研究工具之介紹。

第一節 研究方法

本研究採用文獻計量法與網絡分析法探討生物炭領域之相關文獻，首先使用 Web of Science 資料庫，匯出有關生物炭的研究資料，包含 Excel 檔與文字檔案。利用 Excel 將資料加以清理與分析，接著使用 UCINET 及 VOSviewer 軟體進行網絡分析與文獻計量分析。以 UCINET 軟體對關鍵字、國家進行相關指標計算，VOSviewer 軟體則繪製熱門主題關鍵字之網絡圖、共引作者網絡圖與共引國家網絡圖。透過可視化的圖譜，觀察過去生物炭的發展過程以及探索生物炭未來的研究走向。研究架構如圖 4 所示：

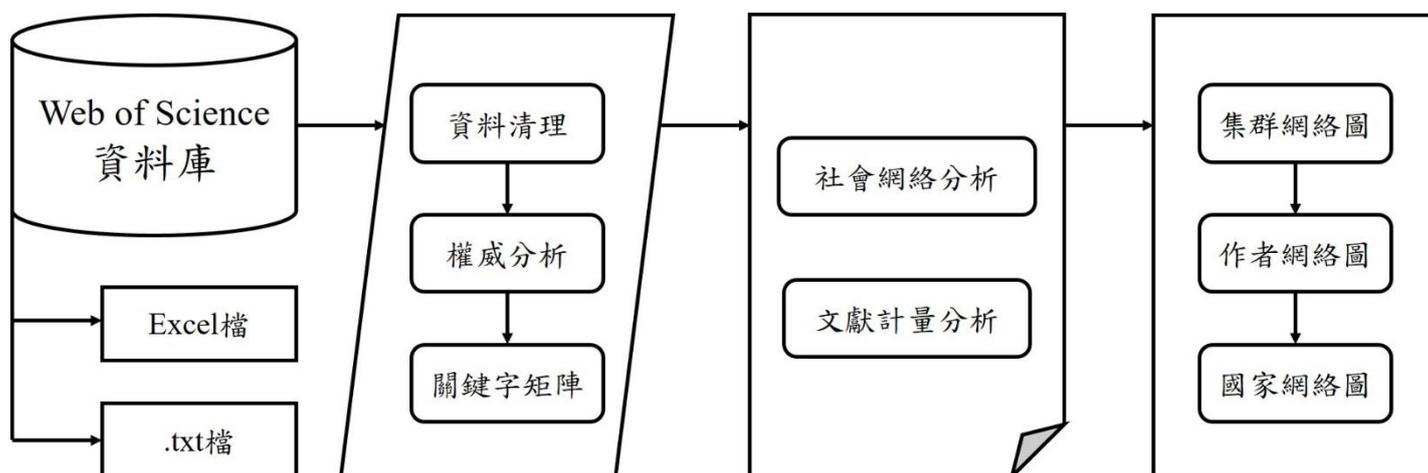


圖 4 研究架構圖

第二節 研究設計



一、 資料收集

Web of Science 為一款網際網路版引用文獻索引資料庫系統，為美國 Clarivate Analytics 於 1997 年間建置而成。WOS 裡有 254 個學科領域類別，最新可回朔甚早至 1900 年的豐富資訊，其收錄全球各學科多領域的期刊資料，包括公開得以取用之期刊與會議紀錄。而該網站擁有強大的瀏覽、搜索、排序和保存等功能，提供使用者查找於各學科專業領域之摘要、作者、出版日期、關鍵字、相互引用與文獻書目之相關紀錄，並允許將數據導出，是全世界大多數引文研究使用的標準工具。故本研究於 2022 年 3 月在 WOS 資料庫對生物炭之相關的研究進行檢索。

生物炭以英文 “Biochar” 作為關鍵字搜尋文獻，進行欄位探索，收錄文獻資源之主題名稱、摘要、關鍵字、作者等相關欄位，包含關鍵字之文獻，共搜尋到 21,994 篇透過查詢結果再次收斂資料庫文獻資料，匯出核心文獻作為本研究的研究基礎，共計 820 篇，如圖 5 所示：

The screenshot shows the Web of Science interface with search results for 'biochar'. The search bar contains 'biochar (所有單位)'. The results list shows two articles:

Rank	Title	Author(s)	Year	Journal	Citations
1	Past, present, and future of biochar	Chen, WF; Meng, J (-); Zhang, WM	Mar 1 2019	BIOCHAR 1 (1), pp.75-87	103 引文文獻 151 參考文獻
2	Efficient elimination of organic and inorganic pollutants by biochar and biochar-based materials	Hu, BW; Ai, YJ (-); Wang, XK	Mar 2020	BIOCHAR 2 (1), pp.47-64	134 引文文獻 138 參考文獻

圖 5 Web of Science 之 “biochar” 核心文獻搜索結果

從下方表 4 條列本次研究中，生物炭前 10 篇引用次數最多次之文獻資料，可由其引用次數判斷出各個文獻在此領域中具有相當程度的代表性與參考價值。其中顯示出最高被引用次數的文獻，被引用次數為 2,491 次，其次引用次數為 2,222 直至第五篇皆還有 1,000 次以上之引用，從被引用次數可以瞭解生物炭領域受到學者一定的關注。

表 4 前 10 篇生物炭之文獻引用次數

級別	參考文獻	引用次數
1	Lehmann, J., et al. (2011). "Biochar effects on soil biota - A review." <i>Soil Biology & Biochemistry</i> 43 (9) : 1812-1836.	2,491
2	Ahmad, M., et al. (2014). "Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water : A review." <i>Chemosphere</i> 99 : 19-33.	2,222
3	Mohan, D., et al. (2014). "Organic and inorganic contaminants removal - A critical review." <i>Bioresource Technology</i> 160 : 191-202.	1,309
4	Jeffery, S., et al. (2011). "A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis." <i>Agriculture Ecosystems & Environment</i> 144 (1) : 175-187.	1,238
5	Yuan, J. H., et al. (2011). "The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures." <i>Bioresource Technology</i> 102 (3) : 3488-3497.	1,045
6	Beesley, L., et al. (2011). "A review of biochars' potential role in the remediation, revegetation and restoration of contaminated soils." <i>Environmental Pollution</i> 159 (12) : 3269-3282.	970
7	Tan, X. F., et al. (2015). "Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions." <i>Chemosphere</i> 125 : 70-85.	896
	Kan, T., et al. (2016). "Lignocellulosic biomass pyrolysis : A review of	

8 product properties and effects of pyrolysis parameters." *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 57 : 1126-1140. 894

Biederman, L. A. and W. S. Harpole (2013) . "Biochar and its effects on

9 plant productivity and nutrient cycling : a meta-analysis." *Global Change Biology* 5 (2) : 202-214. 865

Zimmerman, A. R., et al. (2011) . "Positive and negative carbon

10 mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils." *Soil Biology & Biochemistry* 43 (6) : 1169-1179. 857

二、 資料處理

本研究使用 Microsoft Excel 作為生物炭相關文獻整理資料庫，其中資料包含文獻標題、關鍵字、國家、發表日期等。Excel 是美國微軟公司所發展出來的試算表作業系統，具有整合性套裝軟體與直觀之介面和優異的計算功能，在市場行銷下使 Excel 成為 Windows 環境下非常受歡迎的整合性套裝軟體。經整理，生物炭文獻資料庫如下圖 6 所示：

NO	Article Title	Keywords	country	Publication Month
1	Past, present, and future of biochar	GREENHOUSE-GAS EM	United Kingdom	MAR 1
2	Efficient elimination of organic and inorganic pollutants by biochar and biochar-based materials	ZERO-VALENT IRON; S	United Kingdom	MAR
3	Influence of production conditions on the yield and environmental stability of biochar	BLACK CARBON; SOIL	United Kingdom	JAN
4	Review of organic and inorganic pollutants removal by biochar and biochar-based composites	ZERO-VALENT IRON; I	Netherlands	SEP
5	Biochar and bacteria inoculated biochar enhanced Cd and Cu immobilization and enzymatic activity in a polluted soil	MICROBIAL COMMUN	United Kingdom	APR
6	A review on biochar production techniques and biochar based catalyst for biofuel production from algae	SOLID ACID CATALYS	United Kingdom	MAR 1
7	Recent advances in utilization of biochar	CARBON FUEL-CELL; I	United Kingdom	FEB
8	The role of biochar and biochar-compost in improving soil quality and crop performance: A review	GREENHOUSE-GAS EM	United Kingdom	OCT
9	Returning biochar to fields: A review	SOIL PHYSICAL-PROPI	America	AUG
10	Effect of different biochar and fertilizer types on N2O and NO emissions	NITROUS-OXIDE EMIS	United Kingdom	MAR
11	Preparation of biochar and biochar composites and their application in a Fenton-like process for wastewater decontamination: A review	SLUDGE-DERIVED BIC	United Kingdom	FEB 1
12	THE DARK SIDE OF BLACK GOLD: Ecotoxicological aspects of biochar and biochar-amended soils	POLYCYCLIC AROMA	America	FEB 5
13	Production and utilization of biochar: A review	FLASH CARBONIZATI	Netherlands	AUG 25
14	Biochar: Production, properties and emerging role as a support for enzyme immobilization	PYROLYSIS TEMPERA	United Kingdom	MAY 10
15	Engineered/designer biochar for contaminant removal/immobilization from soil and water: Potential and implication of biochar modification	COATED BAMBOO CH	United Kingdom	APR
16	Biochar amendment to coarse sandy subsoil improves root growth and increases water retention	ORGANIC AMENDMEN	United Kingdom	MAR
17	Biochar technology in wastewater treatment: A critical review	MICROWAVE-ASSISTE	America	AUG
18	The way forward in biochar research: targeting trade-offs between the potential wins	LIFE-CYCLE ASSESSM	Netherlands	JAN
19	Biochar application to low fertility soils: A review of current status, and future prospects	GREENHOUSE-GAS EM	United Kingdom	MAR 1
20	Application of biochar and its composites in catalysis	PERSISTENT FREE-RA	United Kingdom	FEB
21	Recent developments on algal biochar production and characterization	CERIA-BASED CATAL	United Kingdom	DEC
22	Magnetic biochar for environmental remediation: A review	SLUDGE-DERIVED BIC	United Kingdom	FEB
23	Biochar for crop production: potential benefits and risks	GREENHOUSE-GAS EM	United Kingdom	MAR
24	Biochar as a Catalyst	SOLID ACID CATALYS	Netherlands	SEP
25	Biochar-based adsorbents for carbon dioxide capture: A critical review	DIFFERENT PYROLYSI	United Kingdom	MAR
26	Insights into biochar and hydrochar production and applications: A review	MANURE-DERIVED BI	America	MAR 15

圖 6 生物炭文獻資料庫內容架構圖

將 WOS 匯出 820 筆相關資料之 Excel 檔中重複、沒有作者國籍或沒有發表日期之文獻刪除，並保留標題、關鍵字、國家、發表日期等欄位，得以進行再者的，資料處理與分析，並將關鍵字製成運算矩陣。以下詳述各欄處理方式：

(1) 關鍵字：

合併 Author Keywords 與 Keywords Plus 兩個欄位，並將複數關鍵字如 biochar 與 biochars 作為同一關鍵字計算。

(2) 國家：

採用第一作者之國籍作為本研究之主要探討國家。

(3) 發表日期：

採用文獻之出版月份及年份。

(4) 建立分析指標：

本研究使用 UCINET 軟體建置知識網絡圖譜與中心性數值，該軟體是由加州大學一群網路分析者編寫的，其功能為一套成熟之數據分析軟體。該軟體能寫入多樣不同格式之文字檔案，包含 Excel 之文件。而社會網絡分析方法中包含，中心性分析；子群分析；角色分析及置換的統計分析等。更包括矩陣分析程式。例如，矩陣代數、多元統計。

其中文獻計量數值的程度中心性、中介中心性、接近中心性，依據於相異之指標分析樣態，進行更詳盡的解釋。程度中心性代表一個點與其他點直接連線的總和。中介中心性則表示當一個節點作為任意其他兩個節點間的最短橋梁之次數，若一個節點擔任中介詞的次數越多，則代表中介中心性的程度越大。而接近中心性則說明，當需要考慮每個節點至其餘節點的最短路徑之平均長度，對於一個節點而論，若距離其他節點越近，中心度越高。

(5) 建立網絡分析圖：

本研究使用 VOSviewer 軟體建立作者、期刊、關鍵字的網絡知識圖，VOSviewer (Visualization of Similarities Viewer, 簡稱 VOS) 軟體為荷蘭萊頓大學科學研究中心 (CWTS) 所開發的文獻計量分析工具。且軟體支持大規模樣本數據處理，操作程序簡單且圖像展現方式較為豐富，適用於執行文獻資料庫之書目分析，能提供視覺化網絡、標籤、密度的知識圖譜，並計算每一個名詞的相關度。例如：可將研究人員顯示為圓圈，圓圈的大小代表出版物的數量，而兩個研究人員的位置越近，代表他們之間的聯繫就越緊密，並且傾向於引用相同的出版物，不同的顏色表示研究者群體之間的聯繫更加緊密。



故此以視覺化的方式呈現其關係圖，使網絡知識圖譜益於掌握文獻趨勢、較多關注領域、作者之間的合作互動以及哪些期刊經常被引用等狀況，並且得出目前研究樣態、找出與最合作關係較為密的作者、邊緣作者，還有哪些研究領域較多人在研究、或哪些領域極少人再接觸，做為未來研究生物炭研究的參考方向。

第四章 研究結果



本章將分為四節，第一節為基本資料建立；第二節為關鍵字文獻計量圖譜分析；第三節為作者與期刊共被引分析；第四節為各國研究網絡的分析。

第一節 基本資料建立

在基本資料的建置上，將共 820 篇之高被引文獻彙整製表後可以發現，高被引文獻之全球國家數量共有 61 發表相關文獻。篇幅數量上，亞洲在總和上位居首位共計有著 439 篇文獻，百分比為 53.54 %，有著過半數的表現，其次為歐洲大陸數量上共有 169 篇，百分比表現為 20.60 %，再者為美洲大陸共計 116 篇，百分比表現上為 14.15 %。各洲文獻發表數量及百分比如表 5 所示：

表 5 各洲文獻發表數量及百分比

洲	國家數量	數量 (篇)	百分比 (%)
亞洲	20	439	53.54
歐洲	22	169	20.60
美洲	6	116	14.15
大洋洲	2	69	8.42
非洲	11	27	3.29
總計	61	820	100%

再者延續分析各大洲間之國家組成，亞洲國家發布最多文獻的國家為中國，共佔亞洲文獻數量之 53.76 % (236 篇)；在歐洲發表論文最多的國家為德國，共佔歐洲文獻數量之 21.9 % (37 篇)；美洲發布最多論文的國家為美國，共佔美洲文獻數量之 77.59 % (90 篇)。而論文發表數量前五的國家為中國、美

國、韓國、澳洲（51 篇）以及德國，臺灣則為第 17 名（9 篇）。因此除關鍵字群集與作者期刊共被引關係外，本研究將進一步探討高被引文獻發表於 50 篇以上國家（中國、美國、南韓、澳洲）與臺灣生物炭研究與應用上之差異。

表 6 高被引之生物炭文獻各國家數量及排名

排名	國家	數量（篇）
1	中國	236
2	美國	90
3	南韓	61
4	澳洲	51
5	德國	37
6	英國	35
7	印度	27
8	巴基斯坦	26
9	紐西蘭	18
10	加拿大	17
11	沙烏地阿拉伯	15
12	埃及	13
13	西班牙	12
14	馬來西亞	11
15	義大利	10
16	日本	9
17	臺灣	9
18	斯里蘭卡	8
19	波蘭	7
20	土耳其	6

第二節 關鍵字文獻計量圖譜分析



本研究透過生物炭關鍵詞於 Web of Science 資料庫進行檢索，在被高度引用的條件篩選後，蒐集到 820 篇文獻共分析 1,852 個核心關鍵詞，運用 VOSviewer 彙整關鍵字集群知識圖譜與列表，進而探討出全球生物炭領域中應用與研究狀況。

一、 生物炭關鍵字集群分析

本研究進一步將關鍵詞進行集群共詞分析，閾值數值設定上，多次操作下最終設定 5 次以上，並去除較孤立的關鍵字後，助於產出較易判讀性的網絡可視化圖譜（圖 7）。利用 VOSviewer 的 LinLog/modularity 顯示，顏色代表著不同的群集，由圖中圓圈大小則表示該關鍵詞共現性強度，也可清楚看出重要關鍵詞，字體越大，依重要性遞減，圓圈和字體逐漸變小。本研究文獻分析後產出的關鍵字共產出 11 組群集，其中共現性較強之集群則為綠色、紫色、紅色與黃色之 4 大集群。綠色集群為生物炭為首之研究高度鏈結頻率較多的分類，包括：黑炭、碳吸存、二氧化碳等關鍵字；紫色集群為吸附作用作為該分群中總連結強度最高的關鍵字，亦有吸附機制、活性碳等關鍵字；紅色集群中，熱裂解為其高鏈結關鍵字，其中還有生物量、厭氧消化等；最後為黃色集群，該分群高鏈結關鍵字為重金屬，亦有鎘、吸附劑等關鍵字。11 個集群，表明鏈結強度的排序與分類涵蓋著不同的研究領域。下圖 7 為生物炭網絡可視化圖譜，彙整後共詞資訊資料庫則詳細見下方表 7：

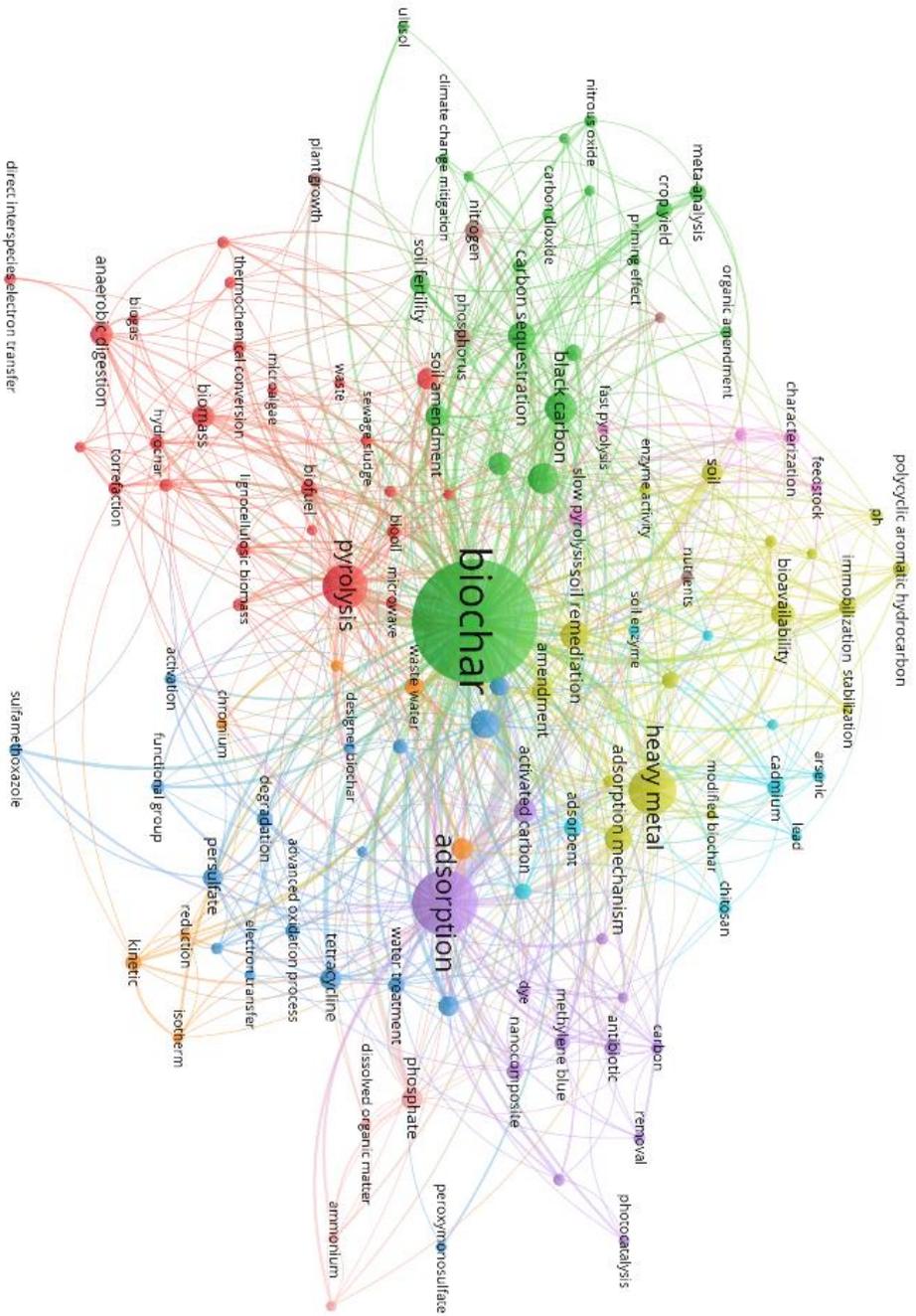


圖 7 生物炭關鍵字網絡可視化圖譜



表 7 生物炭關鍵字群集分類

關鍵詞	群	關鍵詞	群	關鍵詞	群	關鍵詞	群
農業廢棄物	1	土壤有機碳	2	碳	4	磁性生物炭	7
厭氧消化	1	土壤品質	2	奈米碳管	4	土壤酶	7
生物燃料	1	老成土	2	染料	4	廢物增值 與回收	7
生物沼氣	1	生物炭	2	新興污染物	4	生物吸附 作用	7
生物量	1	黑碳	2	水滑石	4	鉻	7
生質油	1	碳吸存	2	亞甲藍	4	等溫線	7
生質精煉程序	1	二氧化碳	2	修正	4	動能	7
催化劑	1	溫室氣體 排放	2	改性生物炭	4	機理	7
堆肥	1	氣候變遷	2	奈米複合材料	4	還原	7
作物殘渣	1	氣候變遷 減緩	2	光催化作用	4	廢水	7
直接電子 傳遞方式	1	作物產量	2	移除	4	銨	8
食品廢棄物	1	活化	3	水污染	4	脫附作用	8
水熱合成碳	1	高級氧化 程序	3	校正	5	溶解有機質	8
熱溶液	1	球磨機	3	生物有效性	5	磷酸鹽	8
水熱碳化法	1	衰退	3	木炭	5	溶解有機碳	9
木質纖維素 生物質	1	設計生物炭	3	酶活性	5	氮	9
微藻類	1	電子轉移	3	停滯作用	5	營養素	9
微波	1	工程生物炭	3	多環芳香烴	5	磷	9
熱裂解	1	官能基	3	酸鹼值	5	植物生長	9
陰溝污泥	1	奈米零價鐵	3	潛在有毒元素	5	特性化	10
熱化學轉換	1	有機污染物	3	再處理	5	快速熱裂解	10
培燒	1	過硫酸鹽	3	土壤	5	原料	10
廢棄物	1	新諾明	3	土壤汙染	5	表面積	10
廢物管理	1	四環黴素	3	土壤復育	5	慢速熱裂解	10
元分析	2	可持續性的	3	穩定化	5	有機污染物	11
甲烷	2	廢棄物管理	3	吸附劑	6	過氧單 硫酸鹽	11
氧化亞氮	2	廢水處理	3	砷	6		

有機改良劑	2	水的處理	3	生質熱裂解	6	
促發效應	2	活性碳	4	鎘	6	
熱裂解溫度	2	吸附作用	4	殼聚糖	6	
土壤改良劑	2	吸附機制	4	重金屬	6	
土壤肥力	2	抗生素	4	鉛	6	

檢視表 7 關鍵字集群分類，可看出關鍵字可以列出重要的詞彙，但卻會因研究者試驗觀點而造成不適當的集群產生，例如集群 1 中：「農業廢棄物」與群集 10 中：「原料」經判斷應皆屬料源之前其範疇。但在鏈結強度下卻被分為不同群集，其他如群集 1：「熱裂解」、群集 6：「生質熱裂解」、群集 10：「快速熱裂解」也有相同情況產出。為了能解析出研究趨勢，勢必要針對這些關鍵詞進行再勘探，使生物炭的研究主題及相關議題的知識架構關係更為明確。結果詳列於下方表 8：

表 8 生物炭研究主題類別勘探表

屬性	研究主題	研究議題	調整後關鍵字集群
性質 範疇	素材	料源	原料、農業廢棄物、作物殘渣、生物質、微藻類、陰溝污泥、生物量、木質纖維素
		化學元素	磷、氮
		溫室氣體	二氧化碳、甲烷、氧化亞氮
	汙染	化合物	官能基、多環芳香烴、磷酸鹽、亞甲藍、過硫酸鹽、殼聚糖、過氧單硫酸鹽、水滑石
		外部成本	廢水、食品廢棄物、新興污染物、有機污染物、水污染、有機污染物、廢棄物、氣候變遷、溫室氣體排放、潛在有毒元素、土壤汙染
		重金屬	鉛、鉻、鎘、砷、銻、重金屬
活動 範疇	物理 與 化學	材料	球磨機、奈米碳管、奈米複合材料、奈米零價鐵
		化學作用	生物吸附作用、吸附作用、吸附機制、脫附作用、促發效應、停滯作用、光催化作用
		熱裂解相關	熱裂解、快速熱裂解、慢速熱裂解、生質熱裂解、熱裂解溫度
	試驗 與 管理	試驗設計	直接電子傳遞方式、生質精煉程序、電子轉移、元分析、熱化學轉換、高級氧化程序、水熱碳化法、厭氧消化、微波、培燒
		程度比較	等溫線、酸鹼值、表面積、酶活性、土壤品質、生物有效性、活化、衰退、特性化、還原、機理、動能
		經營管理	廢物增值與回收、廢棄物管理、可持續性的廢棄物管理、廢水處理、水的處理
實體 範疇	產出	碳與炭品	碳、生物炭、木炭、黑碳、活性碳、水熱合成碳、工程生物炭、設計生物炭、改性生物炭、磁性生物炭、土壤有機碳、溶解有機碳、溶解有機質
		農業活動	堆肥、作物產量、植物生長、生質油、染料、生物燃料、生物沼氣、土壤、老成土、土壤肥力、土壤酶
	影響	生物炭效益	催化劑、吸附劑、有機改良劑、土壤改良劑、四環黴素、新諾明、抗生素、營養素
		可持續性的發展	碳吸存、氣候變遷減緩、校正、修正、移除、再處理、穩定化、土壤復育



生物炭研究主題類別勘探表依照其研究與應用性質、活動與實體三種不同範疇皆有對應的關注焦點與連結性。性質焦點在於生物炭的素材與污染，關鍵字經分類可看出在生物炭在製備中料源的取向與本身的化學元素，另一主題在於，因外部成本與重金屬的汙染前提下，生物炭在移除的過程中扮演怎樣的角色；活動範疇焦點在於生物炭品在燒製的過程中，會經由物理與化學的特性，產出不同屬性之效用，另一方面，試驗與管理中，生物炭作為通氣性和透水性極佳的多孔性材料在試驗設計與不同的經營管理方式規畫下亦會產出不同的效益；最後，實體的範疇則為生物炭品的產出與帶來的正向影響。

(一) 素材

該類關鍵字主題所探討之研究議題，主要為料源、化學元素、溫室氣體與化合物等。料材的使用是影響生物炭成分組成與後續成效的關鍵因素，作為最前期的範疇，原料選擇的方面任何有機生質物皆能加工製成生物炭（蔡佳儒、吳耿東，2016），因此在永續環境的概念下，農業廢棄物的選擇或是其他料源的試驗皆為研究重視的焦點。再者，生物炭的使用概念牽涉到內部富含的化學組成，與其吸附重金屬物質的特性，及溫室其體與化合物如多環芳香烴，屬研發生物炭產品過程中不容忽視的一環。因而，本研究觀察發現，此類的研究主題多為探討生物炭的製程與過程中衍生的其他產物。如：Bianco et al. (2021) 於研究中發現由於人類活動，多環芳烴對沉積物的污染已廣泛傳播，迫使研究和開發有效的修復技術以實現沉積物的高效處理和再利用。Nie et al. (2018) 研究甘蔗渣製成之生物炭對於鎘、銅和鉛的生物有效性以及受污染土壤中土壤微生物群的健康，結果顯著增加了小白菜的產量。

(二) 汙染

一直以來，環境污染的議題也是眾人關注的焦點，因工業發展等多重原因，使農田土壤或灌溉溝埤受到汙染，故生物炭往往連結作為介質成為改善的方式。在學術研究上，汙染也常為生物炭的研究前端因素，在於探討如何使用

其物質特性優化被迫害的生態。如：Hussain et al. (2017) 討論了生物炭為提高作物產量和減少排放的溫室氣體，以及涉及的潛在風險生物炭避免這些風險的應用和策略。Qiu et al. (2021) 廣泛關注和研究重金屬污染水處理與吸附的優勢，主要通過物理和化學改性方法改進的方法，如物理吸附、離子交換、靜電相互作用和氧化還原反應、沉澱反應等。

(三) 物理與化學

生物炭在物理及化學上獨特的特性因大量的相關研究活動開始慢慢被發掘，除了改良土壤與固碳功能外，還被當作電容器、過濾資材等其他領域應用（蔡佳儒、吳耿東，2016）。而在其物理與化學性質上，必須先藉由溫度控制狀態下使原料進行熱裂解，方能發揮其催化、吸附等相關特性。Li et al. (2017) 總結了生物炭主要使用不同吸附機制吸附砷、鎘、鉛、汞、鉻等金屬元素。Ippolito et al. (2021) 則是整理收集 5,400 篇的同儕審查的期刊文章形成大型資料庫，闡明了熱裂解類型生產風格之間幾乎沒有明顯差異，影響最終結果的關鍵為溫度的差異，更大的熱裂解溫度還可使生物炭含有更大的含碳量與孔隙之比表面積。

(四) 試驗與管理

生物炭與其他農用資材等相比，一般大眾對於其認識不如化學肥料或有機堆肥來的熟悉（蔡佳儒、吳耿東，2016）。因此需要長期的在農地上進行試驗，比對不同原料、作物、生物炭、土壤類型及地理環境利用各方法學互相搭配的結果如何，以確切掌握生物炭的施作效益，釐清生物炭在使用上的定位與特性。Jeffery et al. (2017) 利用元分析表明生物炭平均而言，對於溫帶地區的作物產量沒有影響，但熱帶地區的產量平均增加了 25%，生物炭通過石灰和施肥提高產量，這與熱帶地區可耕地之土壤低 pH 值、低肥力和低肥料投入結果有著互補性。Qambrani et al. (2017) 說明牲畜糞便、飼料殘留物與墊料廢棄物皆是潛在的生物炭料源，並可以通過回收後再利用來減少處置浪費的額外成本。



(五) 產出

被視為是農業黑金的生物炭有著多種不同的面相，除了具有固碳、土壤改良與作物肥料效果外，所產出的副產物如醋液、炭粉外，也可混和運用於農業活動中。Rajapaksha et al. (2016) 總結和評價生物炭經改性成為工程與設計生物炭後在土壤和水中污染物管理的改性方法與相應機制及其益處。其可能會提高吸附能力及其在環境修復方面的潛在應用。Hussain et al. (2017) 研究生物炭作為土壤改良劑改善作物產量，主要通過提高養分利用效率和保水能力來提高生產力。然而，改進作物產量通常記錄在高度退化和營養貧乏的土壤中，而其在肥沃和健康土壤中的應用則較不顯著。

(六) 影響

除了農業上的效益外，還有大量研究是關於生物炭作為降低氣候變遷風險的潛力工具。生物炭是比生物質更加穩定的碳材料，當被埋入土壤中，亦可作動碳捕捉和碳吸存，減少以溫室氣體型態進入大氣中（蔡佳儒、吳耿東，2016）。效益上，Zhang et al. (2013) 概述了影響生物炭對於重金屬的環境歸宿和有機的污染土壤中，污染物及其對污染土壤修復的意義。氣候變遷的可持續發展上，Jeffery et al. (2015) 表示生物炭的使用為一種多贏的戰略，包括碳封存；提高土壤肥力；生物燃料/生物能源生產；污染物固定化；廢物處置，但在此之前需要有效的比較與量化實驗，提供一個機制和系統框架。

剖析上述關鍵詞再整理後的勘探表與文獻內容的爬梳比對，本研究對於關鍵詞的主題類別進行重新檢視與再次調整，生物炭提供的服務是非常多樣化的，通盤的了解生物炭本質與使用效益是未來生物炭發展所需要的關鍵研究。

表 9 國內生物炭研究共詞頻率之關鍵詞排序

關鍵詞	頻率	關鍵詞	頻率	關鍵詞	頻率	關鍵詞	頻率
生物炭	393	土壤品質	11	原料	6	脫附作用	5
吸附作用	99	衰退	11	奈米零價鐵	6	促發效應	5
熱裂解	64	再處理	10	水滑石	6	改性生物炭	5
重金屬	43	奈米複合材料	10	表面積	6	多環芳香烴	5
黑碳	35	元分析	10	作物殘渣	6	溫室氣體 排放	5
木炭	32	動能	10	微波	6	電子轉移	5
土壤復育	27	磷	10	二氧化碳	6	廢棄物	5
工程生物炭	27	抗生素	10	水污染	6	微藻類	5
吸附機制	26	磁性生物炭	10	農業廢棄物	6	氣候變遷 減緩	5
生物有效性	20	特性化	9	陰溝污泥	6	甲烷	5
土壤改良劑	19	有機污染物	9	氣候變遷	6	溶解有機質	5
活性碳	19	亞甲藍	9	酶活性	6	廢物管理	5
生物量	19	水熱合成碳	8	鉻	6	可持續性的 廢棄物管理	5
熱裂解溫度	19	生質油	8	食品廢棄物	6	光催化作用	5
厭氧消化	19	木質纖維素 生物質	8	移除	6	廢物增值 與回收	5
碳吸存	18	培燒	8	生物 吸附作用	6	生質精煉 程序	5
四環黴素	17	球磨機	8	快速熱裂解	6	老成土	5
機理	17	高級 氧化程序	8	土壤酶	6	過氧 單硫酸鹽	5
土壤	16	植物生長	8	設計生物炭	6		
磷酸鹽	16	染料	7	有機改良劑	6		
堆肥	16	催化劑	7	直接種接 電子傳遞	6		
土壤肥力	15	官能基	7	奈米碳管	5		
過硫酸鹽	15	水熱碳化法	7	穩定化	5		
氮	14	氧化亞氮	7	校正	5		
廢水	14	殼聚糖	7	等溫線	5		
廢水處理	14	新諾明	7	還原	5		
慢速熱裂解	13	熱化學轉換	7	銨	5		
鎘	12	酸鹼值	7	溶解有機碳	5		

停滯作用	12	砷	7	生質熱裂解	5
吸附劑	12	土壤汙染	6	熱液	5
修正	11	碳	6	生物沼氣	5
生物燃料	11	營養素	6	土壤有機碳	5
水的處理	11	活化	6	潛在	5
				有毒元素	
作物產量	11	新興污染物	6	鉛	5



在出現次數的頻率來看，除生物炭本身關鍵詞為最頻繁出現詞之外，「吸附作用」、「熱裂解」、「重金屬」、「黑碳」、「木炭」在限縮後的核心文獻中，關鍵字還有著 30 次以上的出現次數，並在可視化圖譜中黃色也有著較清晰的表徵，顯示以上單詞與生物炭間有著相對高的連結強度，亦為生物炭主題研究的焦點議題。

(一) 「生物炭」與「吸附作用」

生物炭作為一種高效、較低成本的吸附劑，特別是在經由熱裂解反應後生成的多孔性結構特性，使得內部孔隙的表面積較其他材料大，因此具備良好的吸附效果，能夠吸附土壤中的有機污染物，並且減少作物對污染物的吸收 (Yu et al., 2009)。

(二) 「生物炭」與「熱裂解」

熱裂解是在無氧的條件下進行，溫度範圍為 300 度至 900 度。過程中，形成了固體、液體和氣體產物。固體和液體通常分別稱為生物炭和醋液，氣體為合成氣，通常含有二氧化碳、氫氣和一氧化氮。而熱裂解通常包括快速熱裂解和慢速熱裂解。兩者停留時間從半小時到幾個小時不等，與快速熱裂解相比，慢速熱裂解通常具有較高的生物炭產量 (Bridgwater et al., 2012)。與石墨烯等碳材料的常規製備方法相比，熱裂解製備生物炭簡便且成本低，有助於環境可持續性。



(三) 「生物炭」與「重金屬」

重金屬污染對環境的威脅日益嚴重,高效便捷地治理重金屬污染成為當下研究的關注點 (王菁姣, 2015), 而生物炭的優點之一即為吸附重金屬, 但生物炭的性質隨原料和熱裂解溫度的不同而有多種的吸附機制, 不同的機制搭配著不同的一處反應 (Li et al., 2017)。砷金屬元素須利用錯合和靜電相互作用移除; 鉻金屬使用靜電相互作用、還原和錯合作用; 鎘和鉛元素使用錯合、陽離子交換和沉澱作用; 汞元素則使用錯合和還原作用的吸附。

(四) 「生物炭」與「黑碳」

黑碳是一種懸浮粒子, 源自於含碳物質。黑碳主要從一般家庭中焚燒木材和牛糞, 以及為了給室內供暖所使用的煤炭中釋放出來, 而生物炭的至被過程中, 在氧氣受限的環境下, 亦會促成黑碳的產生。而黑碳帶來的影響當中, 其來源雖然分佈在全球但若經常長距離運輸, 沿途與其他氣溶膠混合以形成橫貫大陸的大氣棕色雲層, 將會加快全球暖化的影響 (Ramanathan et al., 2008)。

(五) 「生物炭」與「木炭」

生物炭跟一般的木炭一樣是生物質能原料經熱裂解之後的產物, 且生物炭作為農業資材之生物炭為一種纖細且具有多孔性結構的顆粒, 外觀與一般燃燒所產生之木炭類似 (王紓愨等人, 2018), 但木炭是為特定之生物炭類型。其餘料源上則有, 如小麥稻桿、動物糞便、食品廢料、廢水污泥等。與木炭相比, 生物炭的碳化程度較低, 有著更多的氫和氧與灰燼存在其結構中。木炭在工業和農業上已經使用了幾個世紀 (Mohan et al., 2014)。

綜合對照上述提及, 生物炭共詞頻率排序與關鍵詞密度圖譜及生物炭主題研究的焦點議題。顯示出研究者們熱門主題的關注焦點, 同時也為網絡中更趨近核心的關鍵字群。關鍵詞出現的多寡, 亦意謂著近年生物炭相關主題的成長趨勢。

三、 生物炭關鍵字年份演變

本研究之關鍵字圖譜，由於目的是在於瞭解文獻其發展關係，並觀察其趨勢。在研究文獻上，Web of Science 資料庫中從 2010 年開始，文獻數量成長上才有明顯曲線的上升。本研究中所蒐集之文獻資料庫為限縮後之高度被引用文獻，優點在於快速了解某個領域有影響力的科學家、機構、文章與最前鋒的研究內容（蔡明月，2005）。結果顯示其涵蓋年份從，2012 年至 2021 之間。故使用了以 3 至 4 年為一個區間將其分類為 2012 - 2015、2016 - 2018、2019 - 2021 三個區間，探究生物炭研究中關鍵字的更迭情形，並為了提升關鍵字的廣度，圖譜上把關鍵字出現之最小值設定為 5 方便更容易觀察出過往文獻的趨勢，而出現頻率上則挑選出現次數 10 次以上之關鍵字作為當期生物炭研究高度相關主題。

(一) 2012 – 2015 期間

從 2012–2015 關鍵字出現頻率表 10 得出，該期生物炭研究焦點在於與吸附作用、熱裂解、黑碳、重金屬、木炭的互動與應用。其中又取這個區間引用次數前三名的文獻為代表來驗證，分別為 Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water : A review ; Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar, a renewable, low cost and sustainable adsorbent - A critical review ; Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions 。更能得知吸附作用作為生物炭效益中之核心功能。詳細圖表如圖 9 及表 10 所示：

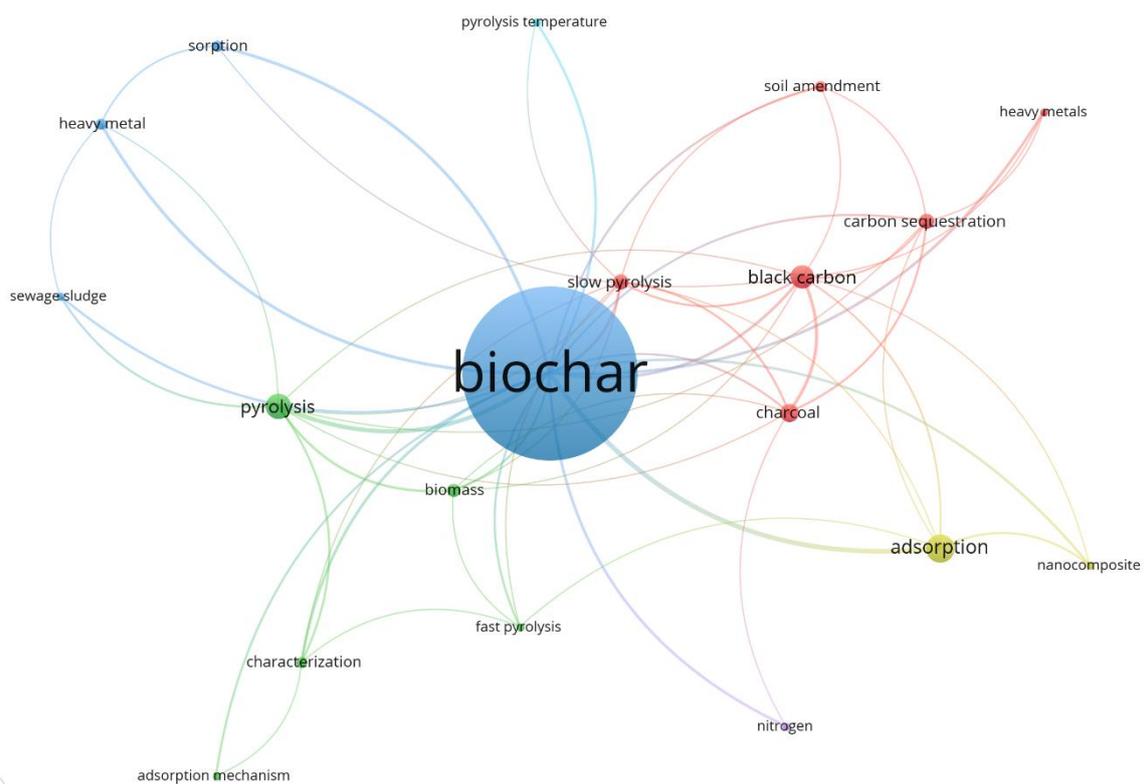


圖 9 生物炭 2012–2015 關鍵字網絡圖

表 10 2012 – 2015 關鍵字出現頻率表

#	Label	Occurrences
1	biochar	103
2	adsorption	29
3	pyrolysis	15
4	black carbon	14
5	heavy metal	12
6	charcoal	11

(二) 2016 – 2018 期間

從 2016–2018 關鍵字出現頻率表 11 得出，該期生物炭研究焦點相較於前期更多出有關於土壤復育的主題。文獻驗證上從 2016 年中挖掘出，除了吸附作用外，Engineered/designer biochar for contaminant removal/immobilization from soil and water : Potential and implication of biochar modification 為排名第五之引用次數的文獻，其說明改性後工程及設計生物炭如何修復受污染的土壤和水的方法。

詳細圖表如圖 10 及表 11 所示：

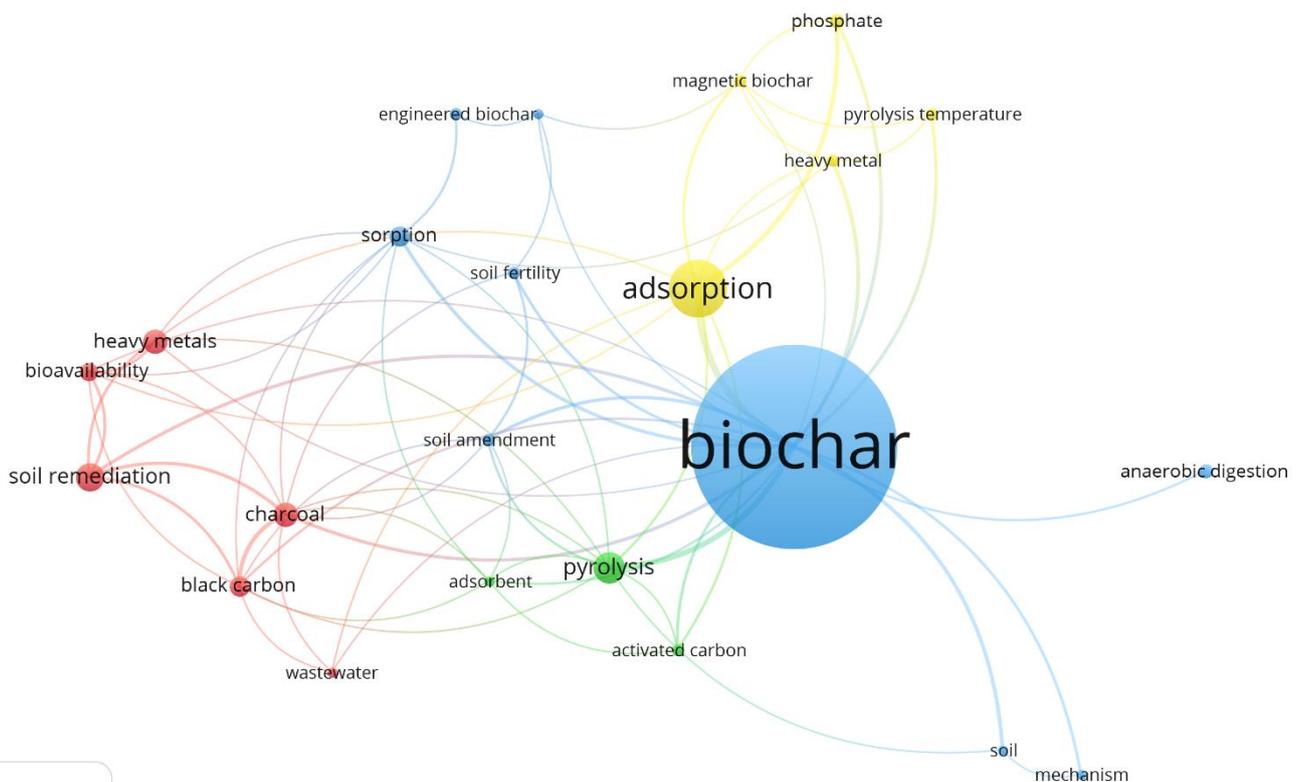
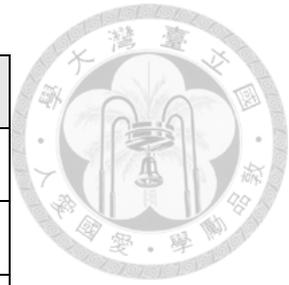


圖 10 生物炭 2016–2018 關鍵字網絡圖

表 11 2016 – 2018 關鍵字出現頻率表

#	Label	Occurrences
1	biochar	98
2	adsorption	38
3	heavy metal	18
4	pyrolysis	15
5	soil remediation	14
6	charcoal	12
7	black carbon	10



(三) 2019 – 2021 期間

最後從 2019 – 2021 關鍵字出現頻率表 12 得出，本期生物炭研究模式為高度發展的時期，互動上新增之詞彙出現像工程生物炭、過硫酸鹽、四環黴素、高級氧化程序、水的處理等關鍵字，該功能上有著如強氧化劑、抗生素、去除生物難分解有機物、管理上的功效。文獻主題上有著如，The magnetic biochar derived from banana peels as a persulfate activator for organic contaminants degradation，說明以香蕉皮為原料的磁性生物炭通過簡單的合成，對於有機污染物的降解作為一種具有成本效益且可回收過硫酸鹽的活化劑；Feasibility study on a new pomelo peel derived biochar for tetracycline antibiotics removal in swine wastewater 闡述生物炭為一種具有成本效益和環境友好的策略，本著作中使用柚子皮為生物炭料源，過程中產生之靜電相互吸附作用從豬隻養殖廢水中去除四環黴素。詳細圖表如圖 11 及表 12 所示：

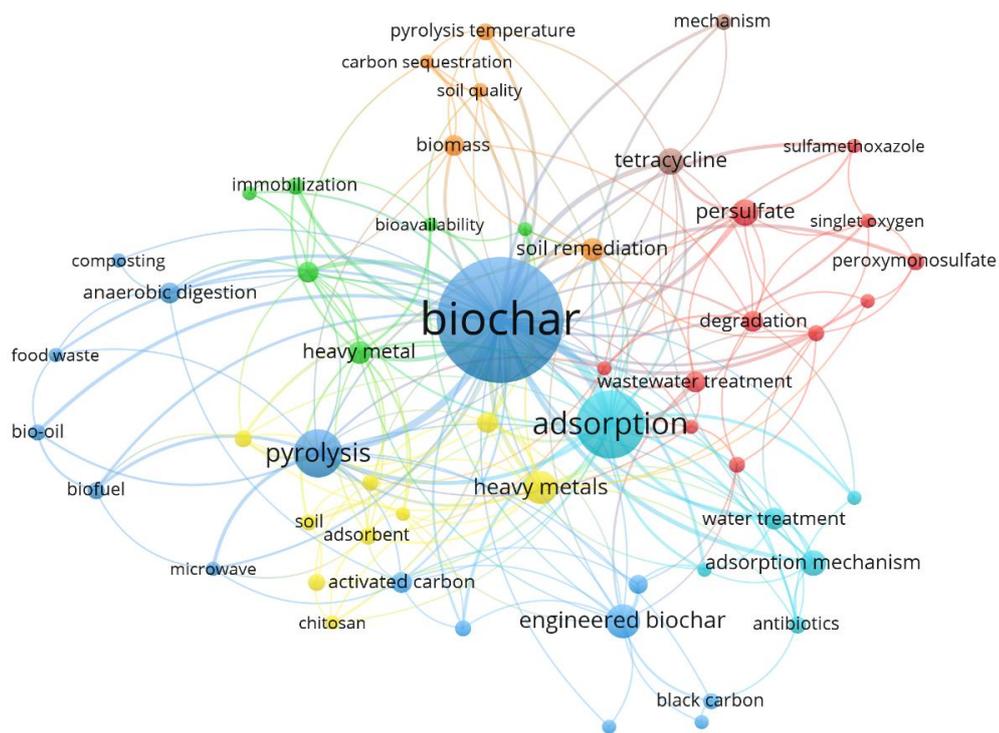


圖 11 生物炭 2019–2021 關鍵字網絡圖

表 12 2019 – 2021 關鍵字出現頻率表

#	Label	Occurrences
1	biochar	173
2	adsorption	88
3	pyrolysis	36
4	heavy metal	31
5	engineered biochar	21
6	persulfate	14
7	tetracycline	14
8	advanced oxidation process	11
9	soil remediation	11
10	water treatment	10



四、 生物炭製成方法疊加分析

綜合前三項所述，在這 820 篇高度引用的核心文獻，可以看出生物炭關鍵字在集群、熱點及年份演變上，關鍵字總與吸附與熱裂解有著極高的共詞頻率。吸附為生物炭中最主要功能效益，而製成的方法則決定了其主要功能效益的結果。

熱裂解、氣化法與水熱碳化法，是生物炭製成的三大方法。過程中，三者燒製系統皆有不同的溫度設定與料源的選擇。除此之外，製成技術的發展也有著不同的演變。在文獻計量法當中，關鍵字疊加分析可使時間因素加入其中，即為將時間疊加到關鍵字共現網絡當中。網絡中不同的顏色對應著關鍵字出現的年份，顏色越藍表示關鍵字出現的時間越早。越黃說明關鍵字出現的時間越晚。本研究透過關鍵字的疊加圖譜，挖掘生物炭在製成的演變中，不同技術的年份演替與技術更新。如下圖 12 生物炭製成方法疊加圖譜及表 13 生物炭製成方法平均起始年分所示：

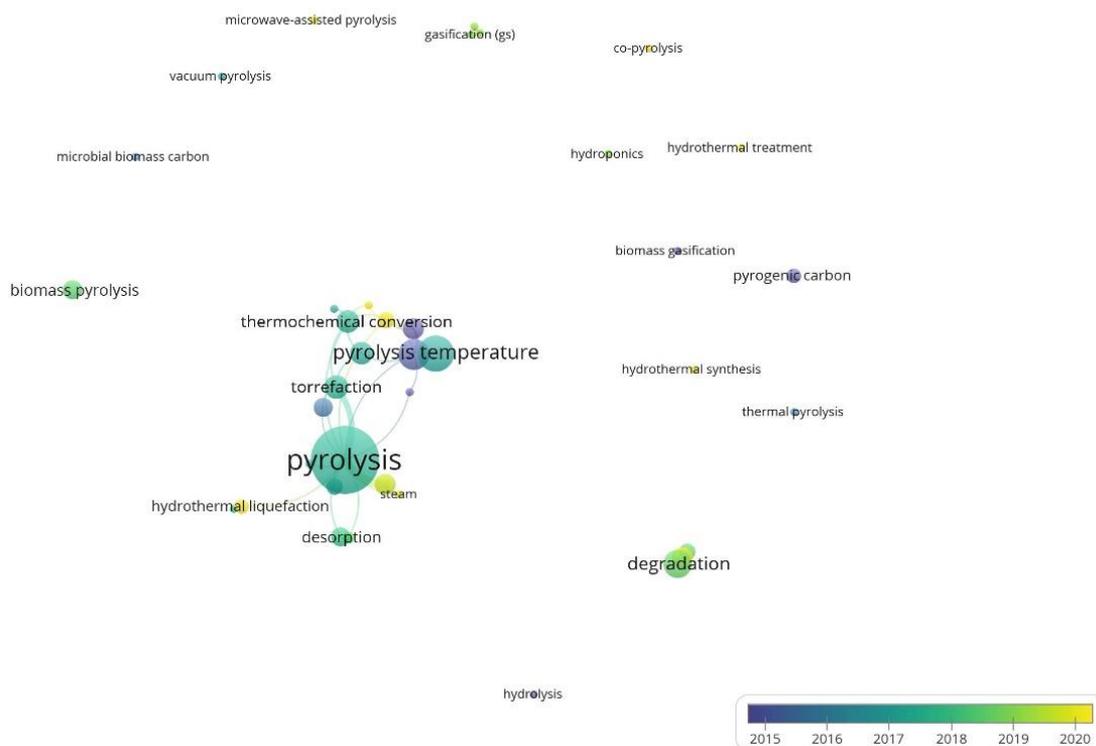


圖 12 生物炭製成方法時間疊加圖

表 13 生物炭製成方法平均起始年份

關鍵字	中譯	出現次數	平均開始年份
slow pyrolysis	慢速熱裂解	13	2015
fast pyrolysis	快速熱裂解	6	2015
pyrolysis	熱裂解	66	2017
pyrolysis temperature	熱裂解溫度	18	2017
pyrolysis and torrefaction	熱裂解和火化	1	2017
vacuum pyrolysis	真空熱裂解	1	2017
biomass pyrolysis	生物質熱裂解	5	2018
microwave assisted pyrolysis	微波輔助熱裂解	8	2020
catalytic pyrolysis	催化熱裂解	4	2020
co-pyrolysis	共同熱裂解	1	2020
biomass gasification	生物質氣化	1	2015
gasification	氣化	2	2017
hydrothermal carbonization	水熱碳化	22	2017

對照圖表，在出現次數的數據上，以製成三方法來說，出現次數的頻率分別為熱裂解 66 次；水熱碳化法 22 次；氣化法 1 次。可充分了解製成方法中，熱裂解為技術應用的大宗，其次為水熱碳化法，氣化法則為出現次數最少的製作方法。年份表現上，VOSviewer 在疊加圖譜中，是以平均開始年份所顯示，各文獻的收集匯入軟體後，節點顏色則是由每個關鍵字所處年份的平均時間確立的。以熱裂解來說，從 1998 年至 2021 年之間，共出現過 66 次，最後顏色定位在 2017 年所指的顏色上。

熱裂解系統通常利用窯爐、蒸餾器或其他專業設備，在阻隔氧氣提供的環境下，進行加熱使有機質原料開始熱裂解並同時將其產生的可燃性合成氣排出（蔡佳儒、吳耿東，2016）。依反應時間的長短與熱裂解的溫度（18）又可區分為快速熱裂解（6）與慢速熱裂解（13），兩種熱裂解方法的主要區別在於生物炭和生質油的產率，快速熱解有利於生物油的產率，而慢速熱解有利於生物炭的產率（Kezhen Qian et al., 2015）。綜觀各熱裂解分類之關鍵字，高頻次數關鍵字不外乎熱裂解燒製數度與溫度的區別，但可以從平均年份看出，熱裂解製成方式一直有著技術更新的發展。

氣化系統是一種熱化學過程，通過供應穩定高溫直接加热的管狀反應容器內將空氣導入，使有機質進行炭化。此系統雖產量低，但能有效控制氧氣進入量與反應溫度，生產品質較高且具一致性之生物炭（蔡佳儒、吳耿東，2016）。平均發展年份上與熱裂解時期相同，但因成本、產量的限制因素下技術的更新較無更多的發展，且研究文獻數量上則明顯與熱裂解有著極大的差異。

水熱碳化系統不同於一般用於低水分生物質的熱裂解和氣化法，更適合處理高水分含量的生物質如污水污泥等，通過高溫、高壓將含水的生物質或其他殘渣轉化為燃料和其他工業利益物質。關鍵字出現次數上，收集年份期間共出現 22 次，平均開始年份為 2017 年。但後續的年份上則無更多的相關製成關鍵字產出。

生物炭產業領域近年來蓬勃發展並遍及全球，整體來看在最初的製成階段，熱裂解、氣化法與水熱碳化法，三種方式在發展年份上藉由網絡疊加分析後得出，三著為同期發展之技術，但接續的技術更新在種種限制下，熱裂解的應用最為現今研究技術所應用。

第三節 作者與期刊共被引文獻計量圖譜分析



共被引分析 (co-citation)，其用意在於當有一文獻的產出有引用不同前人研究兩篇以上文獻，則前人文獻之間就具有共被引關係，且當同時被愈多其他文獻引用，表示二者之間之主題相似性愈高。其中作者共被引 (author co-citation) 及期刊共被引 (journal co-citation) 是較常見的共被引類型 (張汝昊，2020)。故本研究終將使用該文獻計量法功能，探究除關鍵字外，生物炭研究與應用中，文獻作者與各知名同儕審查期刊如何互動與呈現。

(一) 生物炭共被引作者與作者的網絡分析

本研究將彙整之生物炭資料庫中進行文獻分析法中作者共被引之功能，原始數據之作者方面因數量過於龐大，顯得有些雜亂不易判讀，幾經重複設定閥值後，最終設定最低出現出數須達 10 次以上，即可看出作者之間的合作關係以及分群，圓點越大代表程度中心性越高，而兩個圓點之間只要有線連接就代表有合作關係。分群上最終產出三大集群，且各共被引關係中更有其核心作者。詳細網絡圖如下圖 13 所示：

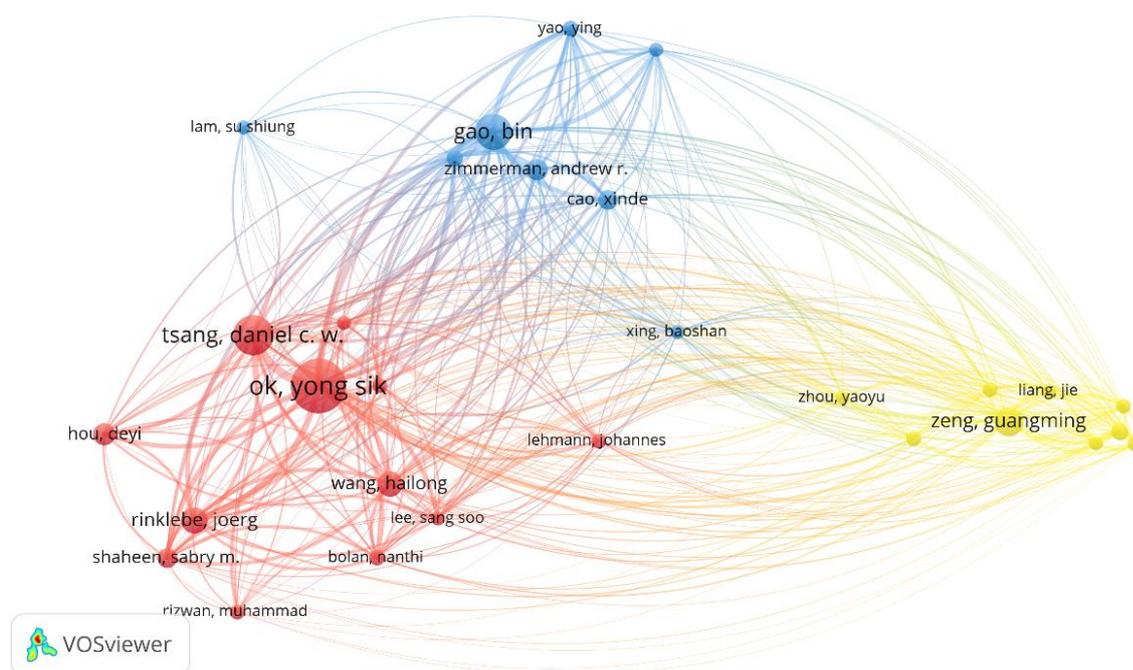


圖 13 生物炭研究共被引作者關係網絡圖



從圖 13 中可以發現，Yong Sik Ok、Bin Gao、Guangming Zeng，三位作者是共被引次數各自集群的關鍵人物，也代表著在生物炭這個領域中各有其獨特觀點，並與其他作者有著承先啟後的關係，在其領域皆有著較多的影響力。Yong Sik Ok 為第一集群中之關鍵學者。其著作，Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water：A review 中，簡要概述了當前生物炭總結和討論了用作土壤和水中污染物管理的吸附劑；Bin Gao 為第二集群中之關鍵學者，著作中 A review of biochar as a low-cost adsorbent for aqueous heavy metal removal 同為一回顧文獻，綜述生物炭對於重金屬的整體吸附行為；最後，Guangming Zeng 為第三集群中之關鍵學者，著作中 Biochar for environmental management：Mitigating greenhouse gas emissions, contaminant treatment, and potential negative impacts 提供了新的見解，以了解生物炭再利用於環境管理方面。詳細主題如表 14 所示：

表 14 共被引作者集群主題分類表

集群	作者	Citations	主題
1	Yong Sik Ok Daniel C.W. Tsang Johannes Lehmann Hailong WANG Sang Soo LEE Vithanage Meththika Bolan Nanthi Rinklebe Joerg Deyi Hou Sabry M. Shaheen	17,319 7,053 5,537 4,344 4,135 4,031 3,840 3,702 2,362 2,238	新型污染物地球化學行為、土壤環境修復、生物炭應用和生物質能等方向研究
2	Bin Gao Andrew R. Zimmerman Ming Zhang Xinde Cao Ying Yao Mandu INYANG	12,665 6,564 6,083 4,927 4,778 3,623	研究主要集中於生物炭技術、奈米環境技術、污染物之去向與轉移等方面

3	Guangming Zeng	6,570	研究各廢棄物經營管理於生物炭之效用與環境系統相關分析
	Xiaofei TAN	2,586	
	Jie LIANG	2,054	

(二) 生物炭共被引期刊與期刊之網絡分析

共被引期刊原始數據中，亦有需多數量之同行評審出版的學術期刊。為提升其精準度，經由重複嘗試後發現閾值同為設定最少 10 次，可以有較佳的視覺化效果，分群上最終顯示出三大集群，Bioresource Technology、Chemosphere、Chemical Engineering Journal 是前三大共被引的節點，代表這三個期刊在此領域中與很多文獻有著密切的關連，也代表在生物炭領域中有著強大的影響力。詳細網絡圖如下圖 14 所示：

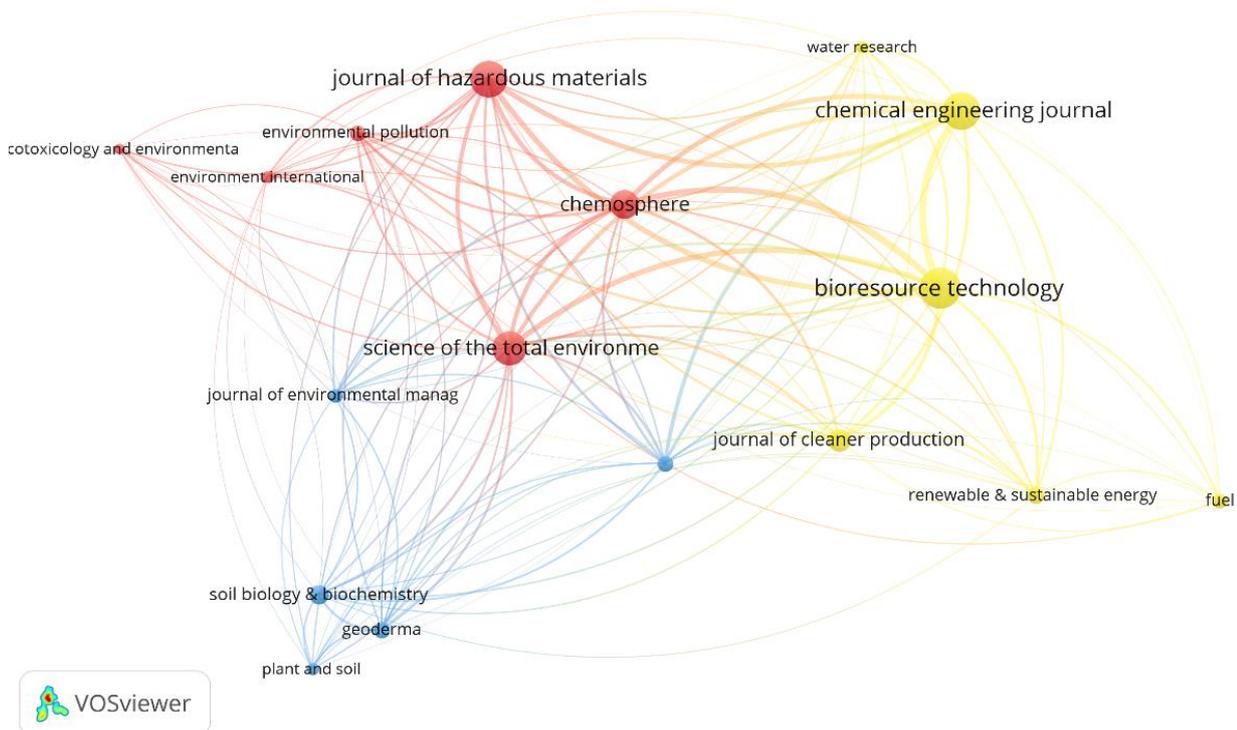


圖 14 生物炭研究共被引期刊關係網絡圖

首先看到 Bioresource Technology 期刊為共被引次數最高的，屬第二集群，該期刊是屬於生物資源分析中非常具有影響力的期刊，其涵蓋與生物質；生物廢棄物處理；生物能源；生物轉化和生物資源系統分析及轉化或生產相關的技術有關的所有領域（潘根興等人，2011），Chemical Engineering Journal 期刊同屬第二

集群，研究領域則為化學與環境工程。其次是第一集群之 Chemosphere 期刊，該期刊的研究領域主要是環境化學領域，提供與環境科學和工程各個方面相關的調查研究。而第三集群中，Soil Biology & Biochemistry 期刊屬較高共被引次數之期刊，其描述和解釋發生在土壤中的生物過程之研究論文。包括在土壤和環境質量問題上的知識及可能的應用，幫助理解土壤生物學和生物化學在調節土壤功能、農業可持續性和生態系統服務方面的作用（張華等人，2001）。從上述個集群期刊得知，不同分群有助於觀察出生物炭文獻中的不同主題專業領域，能更有效地找出該領域的專業知識分佈。詳細期刊共引率與研究領域如下表 15 主題分類表所示：

表 15 共被引作者集群主題分類表

集群	期刊	Citations	研究領域
1	Chemosphere	11468	環境化學
	Journal of Hazardous Materials	9571	環境科學
	Science of the Total Environment	8016	環境科學
	Environmental Pollution	3539	環境污染
	Environment International	1815	環境科學與健康
	Ecotoxicology and Environmental Safety	1275	環境安全
2	Bioresource Technology	19346	生物資源分析
	Chemical Engineering Journal	11153	化學與環境工程
	Renewable & Sustainable Energy reviews	4718	可持續能源研究
	Journal of Cleaner Production	3444	可持續發展實踐
	Water Research	2772	水循環水質管理
	Fuel	2085	能源研究
3	Soil Biology & Biochemistry	8840	土壤中生物過程
	Environmental Science & Technology	5785	環境科學與技術
	Geoderma	4231	農林科學
	Plant and Soil	3389	農林科學
	Journal of Environmental Management	2388	環境經濟管理

第四節 國家網絡研究分析



本節針對 Web of Science 資料庫中對於生物炭主題研究較多篇幅的主要國家與臺灣進行比較，按照數量排序為，中國、美國、南韓、澳洲以及台灣。5 個國家利用 UCINET 與 Excel 繪製關鍵字網絡圖，分析關鍵字之程度中心性、中介中心性、接近中心性與 K-Core 數值。並列出排名前 20 名的關鍵字，其中，程度中心性越高表示該關鍵字在網絡中具有重要地位，故在呈現上將以程度中心性作為降冪呈現之依據。而中介中心性代表該關鍵字為網絡中的橋樑，數值越高表示其越重要，連結的粗細則是對應兩個關鍵字之間的關係強弱。接近中心性可計算節點與其他節點在網絡中的距離，並判斷節點與網絡中其他節點的接近程度，當值越小時表示與其他節點越接近，K-Core 數值則是在網絡中協助尋找出高關聯性群體的測量指標，越緊密結合的分群即被歸類為同一群集。由於關鍵字數量極多，無法有效進行區分，為有助於辨別關鍵字的使用，故去除孤立節點並提升關鍵字門檻值，以呈現易判讀之網絡圖譜。

(一) 中國

表 16 中國關鍵字網絡分析表

NO.	Keyword	Degree	Betweenness	Closeness	K-Core
1	Biochar	269	8,625.034	4.011	5
2	Adsorption	84	1,037.684	4.162	5
3	Pyrolysis	49	355.774	4.210	5
4	Phosphate	27	57.634	4.237	4
5	Tetracycline	24	93.653	4.231	5
6	Sorption	22	321.779	4.237	5
7	Bioavailability	20	111.671	4.226	5
8	Modification	20	33.252	4.226	5

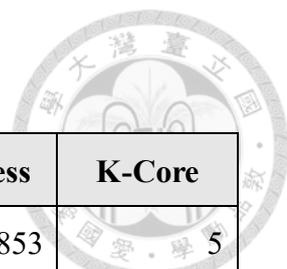
9	Persulfate	20	26.277	4.228	4
10	Soil	19	19.873	4.238	5
11	Wastewater	19	60.042	4.233	4
12	Charcoal	16	33.348	4.231	5
13	Immobilization	16	16.667	4.247	4
14	Cadmium	15	102.819	4.228	5
15	Remediation	14	11.908	4.240	5
16	Mechanism	13	14.480	4.240	4
17	Microwave	13	122.249	4.246	4
18	Nitrogen	13	10.283	4.249	4
19	Chromium	12	27.255	4.226	5
20	Degradation	11	133.354	4.237	4

由上表 16 可看出 Biochar、Adsorption、Pyrolysis 這三個關鍵字在中國生物炭的研究當中是最為被使用的，從最後程度中心性的數值分析上可得出。其餘依序為 Phosphate、Tetracycline、Sorption、Bioavailability、Modification、Persulfate 等，與吸附作用與被吸附之物質雙向互動相關之關鍵字。對應中介中心性，毋庸置疑生物炭為數值最高之關鍵字，而 Adsorption 與 Pyrolysis 亦為第二與第三順位，但原先依序之 Phosphate、Tetracycline、Sorption 則掉至十一、九及第四順位，取而代之像 Sorption、Degradation、Microwave 等化學反應相關，對於關鍵字連接橋樑的工作更顯重要。至於接近度中心性部分，該關鍵字排序呈現則與程度中心性相同。K-Core 分群部分，整體共有 5 群，但在前 20 名關鍵字中，則有著 4 與 5 的集群，而生物炭屬第 5 分群，與 Adsorption、Pyrolysis、Tetracycline、Sorption 等關鍵字有著較密切的關係。

綜合以上，吸附作用、熱裂解與被吸附物質之磷酸鹽、四環黴素，為中國學者較著重的主題。相關中國關鍵字網絡圖如下圖 15 所示：

(二) 美國

表 17 美國關鍵字網絡分析表



NO.	Keyword	Degree	Betweenness	Closeness	K-Core
1	Biochar	141	7,225.224	4.853	
2	Adsorption	57	1,415.028	4.982	4
3	Pyrolysis	25	552.118	5.013	4
4	Sorption	21	326.951	5.041	4
5	Cadmium	19	376.944	5.041	4
6	Nanocomposite	19	199.802	5.039	4
7	Nitrogen	18	448.627	5.057	4
8	Charcoal	17	428.043	5.034	4
9	Leaching	16	86.036	5.032	4
10	Phosphate	14	332.03	5.168	4
11	Phosphorus	14	357.237	5.055	4
12	Adsorbent	13	327.509	5.029	4
13	Soil	12	35.167	5.057	4
14	Lead	11	51.286	5.055	4
15	Removal	10	6	5.084	5
16	Tetracycline	10	28.55	5.05	4
17	Meta-analysis	8	3	5.084	3
18	Nutrients	8	19.146	5.052	4
19	Mitigation	7	660	5.077	5
20	Toxicity	7	45.747	5.202	4



由上表 17 美國關鍵字網絡分析表可看出 Biochar、Adsorption、Pyrolysis 這三個關鍵字在美國生物炭的研究當中是最為被使用的，並從程度中心性的數值分析上可得出。其餘依序為 Sorption、Cadmium、Nanocomposite、Nitrogen、Charcoal、Leaching、Phosphate 等，除有吸附與被吸附之物質雙向互動相關之關鍵字外，還有奈米複合材料相關等名詞敘述關鍵字。中介中心性部分，生物炭屬數值最高之關鍵字，而 Adsorption 與 Mitigation 則為第二與第三順位，原先之 Pyrolysis 則順延至第四順位，其餘關鍵字較高度中心性之 Sorption、Cadmium、Nanocomposite 則掉至第七、十一及十二順位，取而代之像 Nitrogen、Charcoal 等化學元素及木炭關鍵字，在中介性上有著更好的表現，能在連接的工作更顯重要。另外，中介性上數值僅有個位數之關鍵字說明，該關鍵字僅有一端與其他關鍵字連結並且未位於中介位置，故此中介度中心性數值較低。至於接近度中心性部分，該關鍵字排序呈現則與程度中心性大致相同，其中 Leaching 排名則有大幅提升，研判在美國的應用中，化學溶劑從固體中提取可溶物質的浸出過程有更多的著墨。K-Core 分群部分，整體共有 5 群，前 20 名關鍵字中，則有出現 3、4 與 5 集群，而生物炭屬第 5 分群，同分群中還有 Mitigation 與 Removal 等關鍵字，表示其關係有較密切的表現。

綜合以上，吸附、熱裂解與被吸附物質之重金屬鎘、奈米複合材料、生物炭元素氮等，為美國學者較著重的主題。相關美國關鍵字網絡圖如下圖 16 所示：

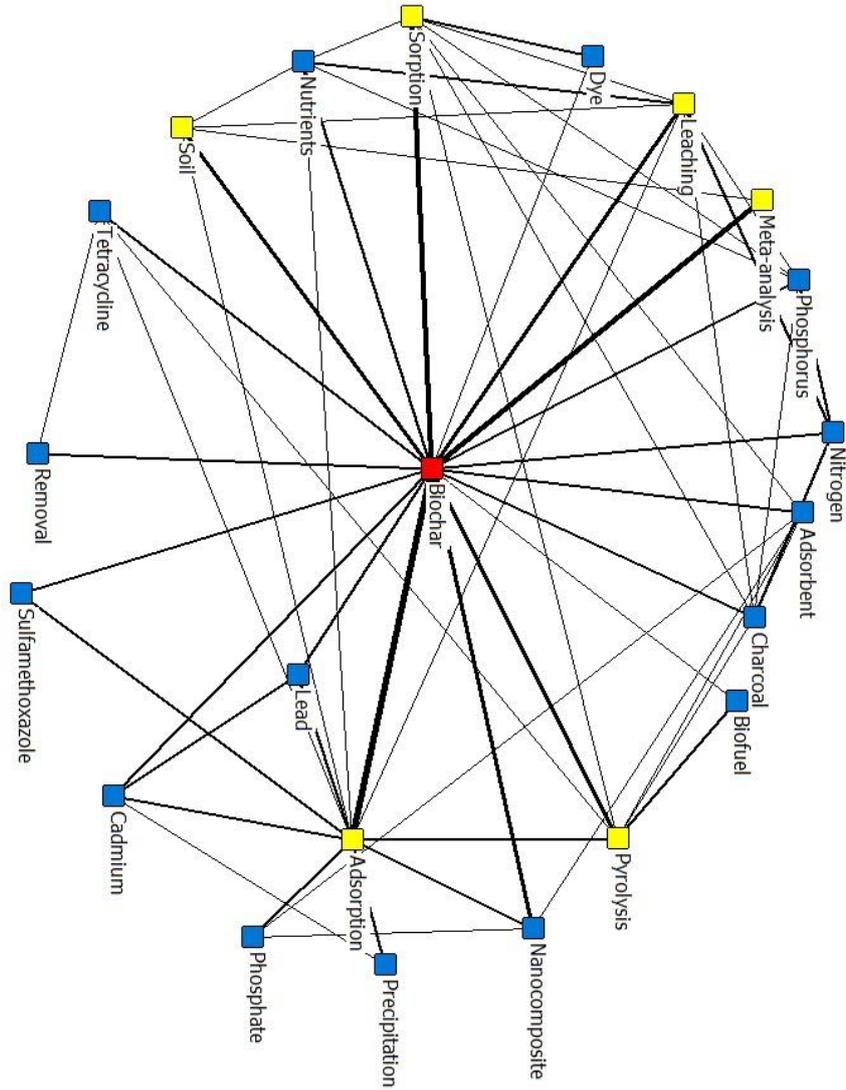
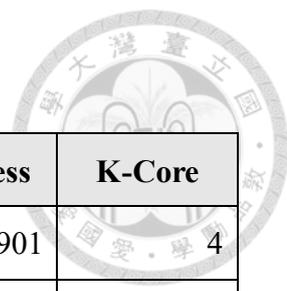


圖 16 美國關鍵字之程度中心性網絡

(三) 南韓

表 18 南韓關鍵字網絡分析表



NO.	Keyword	Degree	Betweenness	Closeness	K-Core
1	Biochar	70	5,075.919	5.901	4
2	Adsorption	21	786.5	6.046	4
3	Pyrolysis	21	914.717	6.046	4
4	Charcoal	16	1,529.879	6.024	4
5	Biorefinery	12	888.05	6.066	4
6	Antibiotics	11	1,136.2	6.048	5
7	Alginate	8	64.8	6.234	5
8	Bio-oil	8	20.952	6.072	4
9	Biosorption	8	370	6.19	4
10	Catalyst	8	25.919	6.068	4
11	Ecotoxicity	8	435	6.083	4
12	Bioavailability	7	437	6.212	2
13	Biofuel	7	172.95	6.076	4
14	Hg (II)	6	189.271	6.083	4
15	Metal	6	55.85	6.094	4
16	Soil	6	59.9	6.087	4
17	Syngas	6	11.467	6.079	3
18	Tetracycline	6	15.071	6.076	4
19	Wastewater	6	102.49	6.359	4
20	Dyes	5	63.6	6.431	5

由上表 18 可看出 Biochar、Adsorption、Pyrolysis 這三個關鍵字在南韓生物炭的研究當中是最主要被使用的，其餘依序為 Charcoal、Biorefinery、Antibiotics 等，與炭品、生質精煉程序、抗生素相關之關鍵字。對應中介中心性，生物炭為該中心性數值中最高之關鍵字，而第二與第三順位則改為 Charcoal 與 Antibiotics 關鍵字，原先依序的 Pyrolysis、Adsorption 則掉至第四及第六順位，反之 Charcoal、Antibiotics、Pyrolysis、Biorefinery 等相關關鍵字則以此微的差距排名上升，對於搭起連接橋樑的工作更為重要。至於接近度中心性部分，關鍵字的顯示大致與前兩項大同小異，同為排名上些微更動而已。K-Core 分群部分，整體共有 5 群，但在前 20 名關鍵字中，則有出現 2 至 5 之群集，其中生物炭屬第 5 分群，與 Alginate、Dyes 等關鍵字有著較高的主題密切性。

綜合以上，吸附與熱裂解可明顯看出為南韓學者較著重的主題，其餘關鍵字中，如生質精煉程序，該關鍵字說明在生物炭的運用上，藉由臨摹石油化學之生物精煉，達到不同的生物質成份之純化與轉化。故此，才能充分循環其利用性的目標，甚至在轉化過程更產出所需要的電能與熱能。詳細南韓相關關鍵字網絡圖如下圖 17 所示：

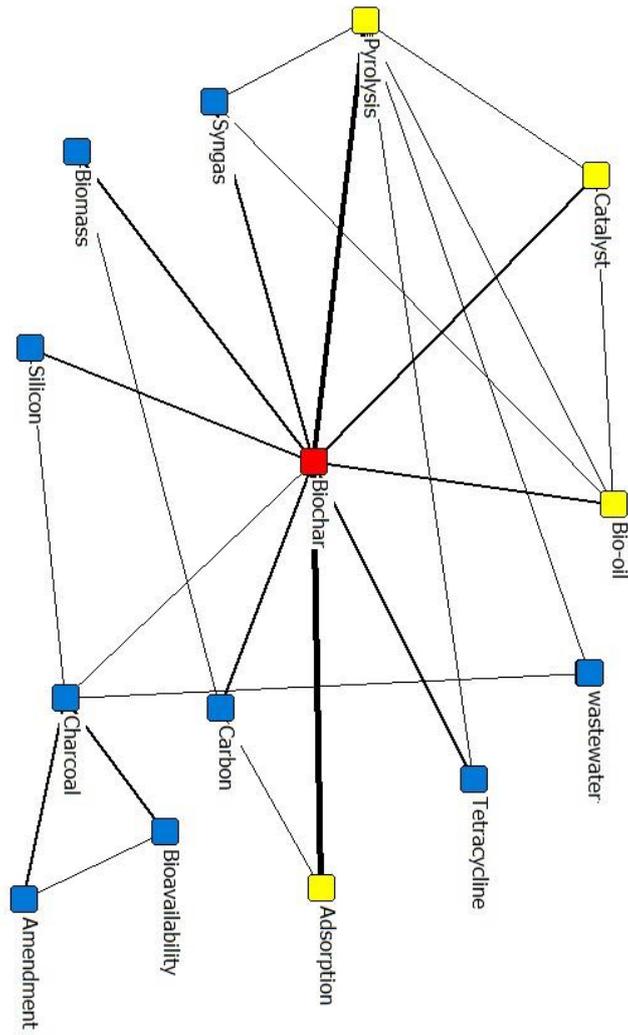
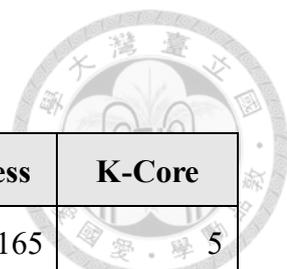


圖 17 南韓關鍵字之程度中心性網絡

(四) 澳洲

表 19 澳洲關鍵字網絡分析表



NO.	Keyword	Degree	Betweenness	Closeness	K-Core
1	Biochar	78	2,431.533	5.165	5
2	Pyrolysis	23	279.133	5.26	5
3	Adsorption	21	185.667	5.297	5
4	Charcoal	10	630.5	5.278	3
5	Soil	10	87.8	5.313	5
6	Remediation	9	63.8	5.311	5
7	Wastewater	8	78.567	5.306	5
8	Biomass	7	10.5	5.299	5
9	Water	7	4	5.318	5
10	Biosorption	6	225	5.413	3
11	Cadmium	6	12.167	5.589	3
12	Carbocatalysis	6	0	5.339	3
13	Nitrogen	6	11.333	5.311	3
14	Nonradical	6	0	5.339	3
15	Peroxydisulfate	6	0	5.339	3
16	Adsorbent	5	182.833	5.432	3
17	Agriculture	5	0	5.942	5
18	Bioavailability	5	177.167	5.436	3
19	Characteristics	5	0	5.323	5
20	Climate	5	0	5.942	5



由上表 19 可看出 Biochar、Pyrolysis、Adsorption 這三個關鍵字在澳洲生物炭的研究當中是最為被使用的，從最後程度中心性的數值分析上可得出。其餘依序為 Charcoal、Soil、Remediation、Wastewater 等相關關鍵字，該等關鍵字與土壤與廢水的修復上有很大的互動性，可知悉在澳洲的生物炭研究上，於土壤改善及廢水的吸附上生物炭皆帶來正向的效益。中介中心性部分，屬數值最高之關鍵字，而 Charcoal 從原先第四順位上升至第二順位，Pyrolysis 則些微下修一順位，其中 Biosorption 原先程度中心性為排名之後段名次，但在中介性上躍升第四順位，代表在澳洲的研究當中，生物吸附有毒重金屬的生理過程為該環境修復主題上重要的探討。其餘 Soil、Wastewater、Remediation 等高度性關鍵字，皆呈現較低之中介性，其中些許中介度中心性數值為 0，表示該關鍵字僅一端與其他關鍵字連結並未位於中介位置。接近度中心性部分，關鍵字在排序的呈現上，與程度中心性無明顯相異。但程度中心較後段之 Biomass 等關鍵字，在接近性上有明顯的上升，表示在生物炭料源上，澳洲學者也有著多樣的研究。最後，K-Core 分群部分，整體來說共有 5 群，在前 20 名關鍵字中，則只有 3 與 5 集群。生物炭屬第 5 分群，與上述關鍵字多屬同群，表示眾主題間彼此互動性多元而頻繁。

綜合以上，熱裂解、吸附功能外，土壤污染、廢水的經營管理上為澳洲學者較著重的主題。相關澳洲關鍵字網絡圖如下圖 18 所示：

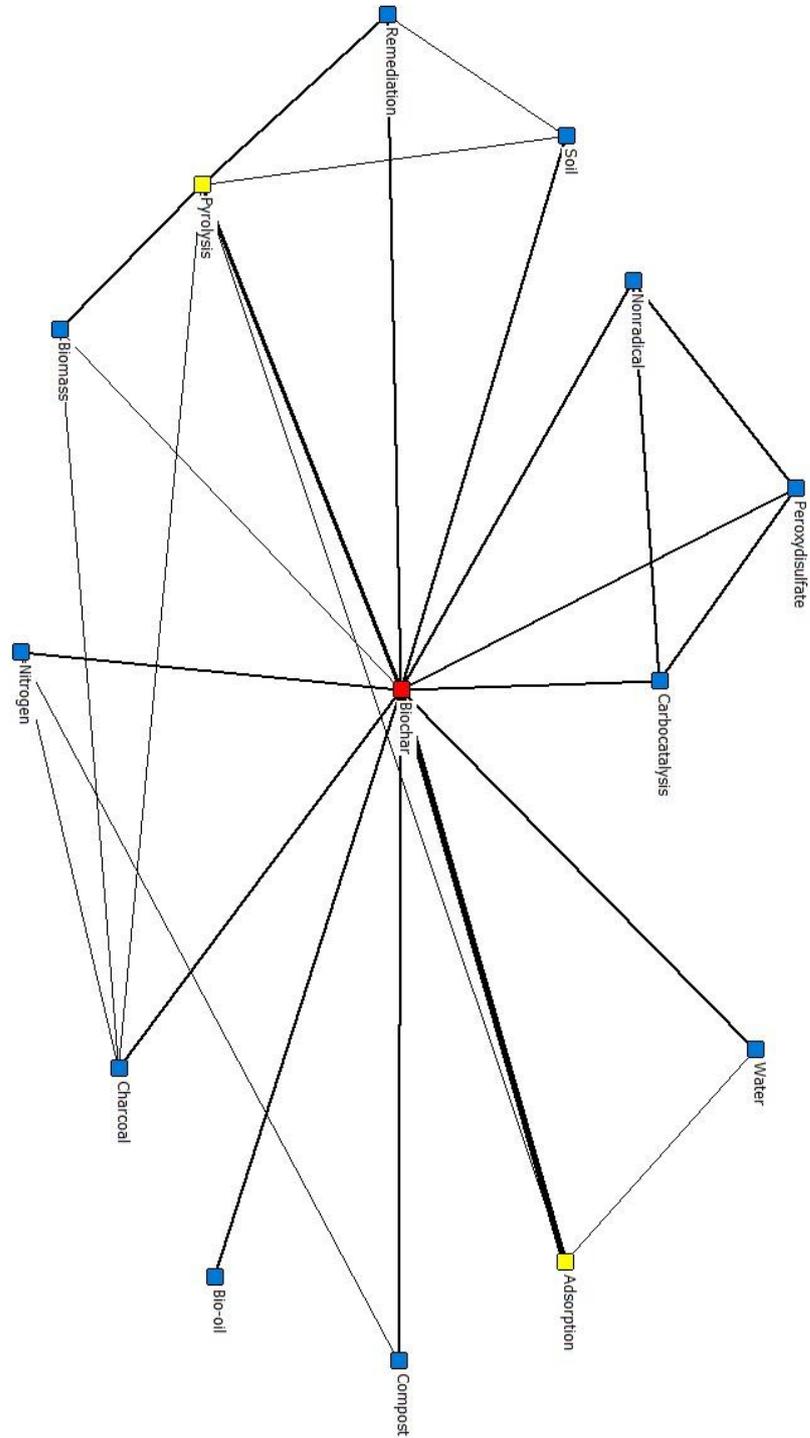
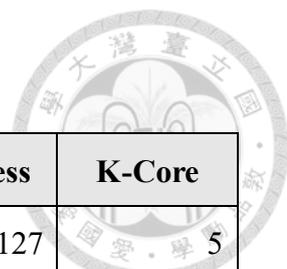


圖 18 澳洲關鍵字之程度中心性網絡

(五) 臺灣

表 20 臺灣關鍵字網絡分析表



NO.	Keyword	Degree	Betweenness	Closeness	K-Core
1	Biochar	33	375.333	3.127	5
2	Adsorption	8	4	3.353	5
3	Biofuel	8	4	3.353	5
4	Bio-oil	6	2.667	3.363	3
5	Catalyst	6	2	3.373	3
6	Biorefinery	5	0	3.373	5
7	Hybrid-conversion	5	0	3.373	5
8	Lignin	5	0	3.373	5
9	Mechanism	5	0	3.373	5
10	Nanocomposite	5	0	3.373	5
11	Pyrolysis	5	15.333	3.363	3
12	SBC/CuO	5	0	3.373	5
13	Sustainability	5	0	3.373	5
14	Thermodynamics	5	0	3.373	5
15	Torrefaction	5	14.667	3.363	3
16	Bioenergy	3	0	3.382	3
17	Chlorophyll	3	0	3.392	3
18	Drought	3	0	3.392	3
19	Lignocelluloses	3	0	3.382	3
20	Modification	3	0	3.392	3

由上表 20 可看出臺灣在數值上皆為較低數值的表現，其主要原因在於文獻數量上較為不足的關鍵因素。但還是可以藉由不同中心性的運算看出，臺灣學者所著作的生物炭主題中，關鍵字上有那些端倪。

Adsorption、Biofuel 這兩個關鍵字在臺灣生物炭的研究當中是較為被探討使用的，另外程度中心性的數值分析上其餘依序為 Pyrolysis、Torrefaction、Bio-oil、Catalyst、Biorefinery、Hybrid-conversion、Lignin 等，該些關鍵字為與物理與化學作用、料源相關關鍵字。對應中介中心性，生物炭理當為數值最高之關鍵字，程度性上則為 Pyrolysis 與 Torrefaction 有著較高的排序，說明著熱裂解與其不同形式，而原先 Adsorption、Biofuel、Bio-oil、Catalyst 則些微下降一些順位，但在臺灣表現之中介性上有著多數中心性數值為 0，代表在整體的主題研究上，是較為發散的研究，僅一端與其他關鍵字連結並未位於中介位置，故在連接橋樑的工作上較無功能存在。最後，接近度中心性部分，該關鍵字排序呈現則與程度中心性較為相同。K-Core 分群部分，整體共有 5 群，但在前 20 名關鍵字中，則有出現 3 與 5 集群，而生物炭屬第 5 分群，同分群中還有 Adsorption、Biofuel、Sustainability 等關鍵字，表示眾關鍵字關係上有較密切的表現。

綜合以上，吸附、生物燃料、熱裂解相關與物理與化學相關作用，皆為臺灣學者生物炭研究中多樣研究試驗的主題。相關臺灣關鍵字網絡圖如下圖 19 所示：

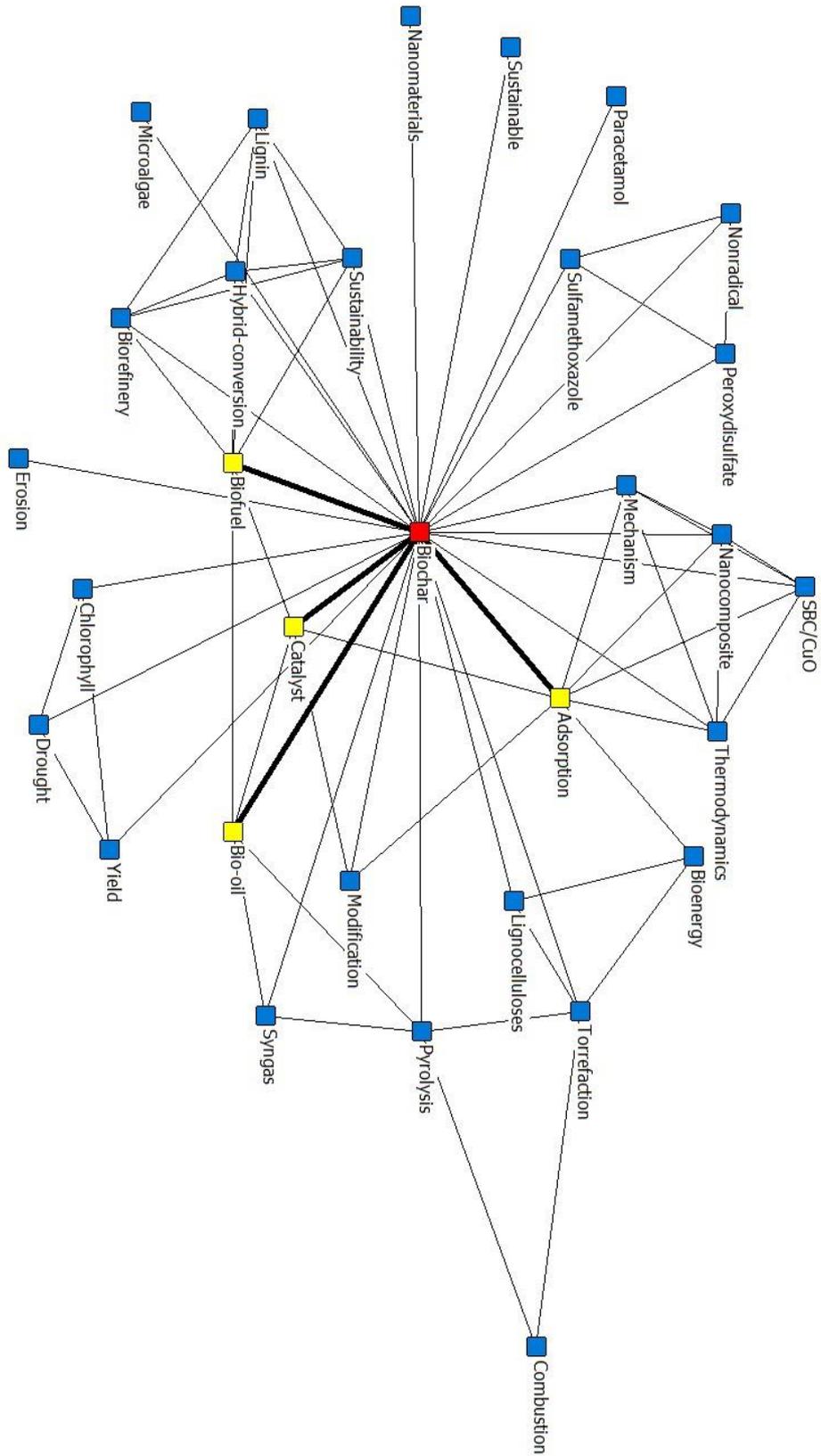


圖 19 臺灣關鍵字之程度中心性網絡

綜觀各國，雖說各國對於生物炭的主題研究與過程大同小異，但還是可以藉由各中心性指數得知在主要研究的主題與最大集群，可以發現中國的研究主題不管是研究主題上的多樣性或是文獻篇幅的數量皆大幅領先全球，表示在可持續的發展上，該國農業發展上，更能體現其綠色經濟、生態環境保護與改善氣候變遷的重要關鍵。美國則是多闡述生物炭作為奈米複合材料，其本身營養素帶來的效益與吸附重金屬元素時不同的功效。南韓，在生物炭研究中則多以其精煉程序有著多元性的研究，以創造多元又可持續的利用之副產品。澳洲的研究主題上，不同於他國，在土壤、水質的修復與管理上有著較多的佔比，表明受污染之自然環境的經營管理為該國的研究重點。最後臺灣的研究篇幅雖不及上述國家，且研究主題中心性關聯上鏈結程度也較低，但也說明著目前的發展上有著多元的目標，奠基於各國成果，我國生物炭未來研究上還有著十足的潛力。

表 21 各國主要研究之主題與最大集群

國家	重點研究
中國	熱裂解、吸附、抗生素、營養素
美國	熱裂解、吸附、重金屬、淋溶作用
南韓	熱裂解、吸附、生質精煉程序
澳洲	熱裂解、吸附、料源、土壤、廢水
臺灣	熱裂解、吸附、生質油、催化劑、生質精煉程序

第五章 研究結論



本研究使用社會網絡分析法及文獻計量法探究生物炭之相關文獻，並進一步的透過知識網絡圖譜期望可以全面地探究其重要研究議題、較具有影響力的期刊、作者、關鍵字以及各國的研究的發展概況，讓研究者們了解到哪些領域族群是較薄弱的，可以加強其投入資源。

本章將分為三節，第一節為研究結論，統整第四章的研究結果並加以討論；第二節為研究貢獻，說明本研究使用社會網絡分析法及文獻計量法的結果對於文獻回顧上研究貢獻；第三節為研究限制與未來研究方向針對本研究進行過程中之限制進行討論，以及未來對於此研究之相關建議。

第一節 研究結論

一、生物炭研究關鍵字圖譜分析結果

根據研究結果發現，生物炭在本研究文獻分析後產出的關鍵字共產出 11 組群集，經爬梳研究主題分類整理後，產出三大範疇，分屬性質、活動與實體範疇。性質範疇中有著素材與汙染相關關鍵詞集群；活動範疇為生物炭的物理及化學性質與試驗及管理相關關鍵詞集群；實體範疇則屬產出與影響相關關鍵字。而在研究熱點上，頻繁出現關鍵字有著「吸附作用」、「熱裂解」、「重金屬」、「黑碳」、「木炭」，五項關鍵詞根據研究者的關注焦點有著多樣的領域研究，而出現頻率的增加，代表該關鍵詞有著明顯成長趨勢與焦點關注度。另外，生物炭知識庫在歷史至今，文獻已有相對完備的篇幅。本研究藉由彙整文獻進行更詳盡的主題分類，分為三個區間，分別為西元 2012–2015 年；西元 2016–2018 年；西元 2019–2021 年，在第一期中，吸附作用為各效益中的核心功能；第二期多關注於改性生物炭的應用；最後一期則為去除生物難分解有機物、管理上的功效。

最後藉由圖譜疊加的方式，了解生物炭製成的方法中熱裂解系統相較於氣化、水熱碳化系統，一直有著技術更新的發展。

回顧前人研究，在目前生物炭議題分類的主題中，Galindo et al. (2021) 使用 Scopus 資料庫進行了文獻計量研究，同樣發現生物炭的研究與應用作為農業和環境問題的多方面解決方案國際趨勢皆正在迅速增長；Weixin et al. (2021) 則基於 VOSviewer 分析，總結了生物炭策略在厭氧消化系統中的吸附、電子轉移和經濟性。

二、生物炭研究作者與期刊共被引分析結果

共引作者網路間的共被引頻率越高代表連結強度越強，則說明他們的學術關係越密切，可以依據此方式將學科領域內的作者加以分類，分群上最終產出三大集群，且各共被引關係中更有其核心作者。第一群之核心學者為 Yong Sik Ok 為南韓環境科學與生態工程領域中的學者；Bin Gao 為中國環境工程科學家，為第二集群中之關鍵學者，專長領域另有污染物水文學；Guangming Zeng 為中國環境科學家，主要從事環境系統分析等方面的研究。

另根據期刊共被引數據得知，Bioresource Technology、Chemosphere、Chemical Engineering Journal 是前三大共被引的節點，代表這三個期刊在生物炭研究領域中與很多文獻間有著密切的關連，也代表在生物炭領域中這三類科學期刊中有著較多篇幅的探討。

三、生物炭研究各國的重要研究議題

根據各國研究議題社會網絡分析後結果可以發現，研究重要議題大多還是集中於吸附與熱裂解，其餘不同關鍵字則表示生物炭的功能應用，各國因各自不同的研究方針，得出不盡相同的闡述，也表明生物炭多樣的效益。其中，中國與美國所研究的主題最為廣泛，原因可從研究數量的多寡推敲得知，當中吸附抗生素與重金屬為研究重點。南韓位居第三，在國際互動當中也有著重要的影響性，其中南韓在生質精煉程序在程度中心性上有更高的數值。澳洲則是在

先天較多貧瘠土地因素下，提升對生物炭研究的動機，於土壤與廢水的管理上有著更多的研究。臺灣早期作為以農立國的國家，但在生物炭的研究與規範上尚未有一套完整的依循制度，故在文獻篇幅上有著較大的落差，但藉由文獻分析與社會網絡分析的聚焦，還是可以發現在生物炭主題系統性的發展中，生物油、催化劑、生質精煉程序屬於臺灣較高程度中心性的關鍵字。

第二節 研究貢獻

氣候變遷讓人類正面臨全球生態環境和生物多樣性的災難減緩全球氣候變化，淨零碳排未來並非易事，但絕非不可能。生物炭在污染物的吸附、農作效益外，作為碳吸存的功能更為改善環境的一大利器。至今，全國各界關於生物炭的文章篇幅已達一定的數量，並獲得高度的關注與引用。本研究使用社會網絡分析法與文獻計量法分析從 Web of Science 資料庫中，高度被引用次數最多的 820 篇文獻，並將所需的資料欄位建立關聯矩陣、知識網絡圖譜，不僅可以更清楚地看出主題的分群，更能找出生物炭主要的研究議題、各國的研究議題與議題的發展情況，從而建立屬於生物炭研究完整的知識網絡，提供學者其文獻的發展概況。

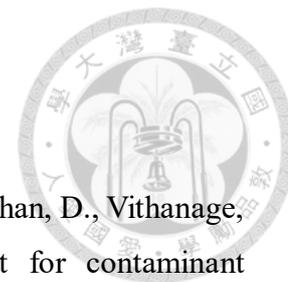
第三節 研究限制與未來研究方向

然本研究分析結果尚有部分限制需說明，針對生物炭之學術期刊文獻，以文獻與社會網絡分析法探討，在資料搜集與資料處理的方式還需精進如下：

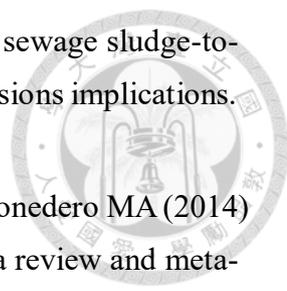
- (一) 本研究為針對 Web of Science 資料庫收錄的生物炭核心期刊進行研究，但在數量上還可再為增加，未來如果學者使用類事的研究方法，希望可以統整兩個以上的文獻資料庫，增加文獻的多樣性，可能會使研究結果更加地準確。

- 
- (二) 本研究本次是採用社會網絡與文獻計量為主軸，建議未來搭配關聯法則使用，藉由其信心水準和支持度兩指標，找出不同項目間關鍵字之關聯性，使研究中專業主題之相關文獻更具豐富。
- (三) 閱讀國外及國內文獻後觀察到，在生物炭的研究上大多還是淪為研究室或小區塊農地之試驗。在市場投入應用端，還有著極大的落差，故建議未來在研究上可加入商業模式之模型，除完整研究生物炭科學探討外亦能帶動、觸發生物炭產業領域之系統化商業研究。

參考文獻

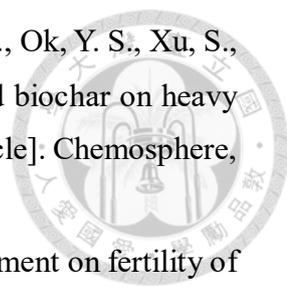


- Ahmad, M., Rajapaksha, A.U., Lim, J.E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., Vithanage, M., Lee, S.S., Ok, Y.S., (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water : a review. *Chemosphere* 99, 19e33.
- Benckendorff, P., & Zehrer, A. (2013). A network analysis of tourism research. *Annals of Tourism Research*, 43, 121-149.
- Benjamin MCF, Stefano MLM, Monica G, Mark S, Johnson SW (2019) Lyon Improving agricultural water use efficiency with biochar— a synthesis of biochar effects on water storage and fluxes across scales. *Sci Total Environ* 657 : 853–862
- Bianco, F., Race, M., Papirio, S., Oleszczuk, P., & Esposito, G. (2021). The addition of biochar as a sustainable strategy for the remediation of PAH-contaminated sediments [Review]. *Chemosphere*, 263, 20, Article 128274.
- Bonacich, P. (1972). Factoring and weighting approaches to status scores and clique identification. *Journal of Mathematical Sociology*, 2(1), 113-120.
- Boonanuntanasarn S, Khaomek P, Pitaksong T, Yang LH (2014) The effects of the supplementation of activated charcoal on the growth, health status and fillet composition-odor of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) before harvesting. *Aquac Int* 4 : 1417–1436
- Börner, K., Chen, C., & Boyack, K. W. (2003). Visualizing knowledge domains. *Annual review of information science and technology*, 37(1), 179-255.
- Bornmann, L., & Mutz, R. (2015). Growth rates of modern science : A bibliometric analysis based on the number of publications and cited references. *Journal of the Association for Information Science and Technology*, 66(11), 2215–2222. doi : 10.1002/asi.23329
- Bretas, V.P.G., Alon, I., (2021). Franchising research on emerging markets : bibliometric and content analyses. *J. Bus. Res.* 133, 51–65.
- Bridgwater, A.V., Bridgwater, A.V., (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass Bioenergy* 38, 68e94.
- Cantner, U., & Graf, H. (2006). The network of innovators in Jena : An application of social network analysis. *Research Policy*, 35(4), 463-480.

- 
- Cao Y, Pawłowski A (2013) Life cycle assessment of two emerging sewage sludge-to-energy systems : evaluating energy and greenhouse gas emissions implications. *Bioresour Technol* 127 : 81–91
- Cayuela ML, Van Zwieten L, Singh BP, Jefery S, Roig A, SánchezMonedero MA (2014) Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions : a review and meta-analysis. *Agric Ecosyst Environ* 191 : 5–16
- Chen WF, Zhang WM, Meng J (2013) Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture. *Sci Agric Sin* 46(16) : 3324–3333
- Chintala R, Mollinedo J, Schumacher TE, Malo DD, Julson J (2014) Effect of biochar on chemical properties of acidic soil. *Arch Agron Soil Sci* 60(3) : 393–404
- Cordeiro, C.M., (2019). A corpus-based approach to understanding market access in fisheries and aquaculture international business research : a systematic literature review. *Aquacult. Fish.* 4, 219–230.
- Cross A, Sohi SP (2011) The priming potential of biochar products in relation to labile carbon contents and soil organic matter status. *Soil Biol Biochem* 43(10) : 2127–2134
- De Bellis, N. (2009). *Bibliometrics and citation analysis : from the science citation index to cybermetrics.* scarecrow press.
- Ding, T., Valkiers, S., Kipphardt, H., De Bievre, P., Taylor, P. D. P., Gonfiantini, R., & Krouse, R. (2001). Calibrated sulfur isotope abundance ratios of three IAEA sulfur isotope reference materials and V-CDT with a reassessment of the atomic weight of sulfur. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(15), 2433-2437.
- El-Naggar A, Sang SL, Jorg R, Muhammad F, Songe Hocheol, Ajit KS, Andrew RZ, Mahtab A, Sabry MS, Yong SO (2019) Biochar application to low fertility soils : a review of current status, and future prospects. *Geoderma* 337 : 536–554
- Ergul, S., Ardahan, M., Temel, A. B., & Yildirim, B. O. (2010). Bibliometric review of references of nursing research papers during the decade 1994-2003 in Turkey. *International Nursing Review*, 57(1), 49–55. doi : 10.1111/j.1466-7657.2009.00770.
- Fu PP, Dong J, Li LQ, Zhang YS, Pan GX, Zhang XH, Zheng JF, Zheng JW, Liu XY, Wang JF, Yu XY (2015) Effects of wheat straw bio-charcoal supplement to fodder on growth, slaughter performance and lipid metabolism of broilers. *J Chin Cereals Oils Assoc* 6 : 88–93

- Galindo-Segura, Luis & Vázquez, Arturo & Landeros-Sánchez, Cesáreo & Gómez-Merino, Fernando. (2021). Bibliometric analysis of scientific research on biochar. *14*. 15-21. 10.32854/agrop.v14i2.1710.
- Garud, R., Gehman, J., (2012). Metatheoretical perspectives on sustainability journals : evolutionary, relational and durational. *Res. Pol.* 41, 980e995.
- Glaser B, Lehmann J, Zech W (2002) Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal—a review. *Biol Fertil Soils* 35(4) : 219–230
- Glaser, B., Haumaier, L., Guggenberger, G. And Zech, W. (2001) The ‘Terra Preta’ phenomenon : a model for sustainable agriculture in the humid tropics. *Naturwissenschaften* 88 : 37-41.
- Hussain, M., Farooq, M., Nawaz, A., Al-Sadi, A. M., Solaiman, Z. M., Alghamdi, S. S., Ammara, U., Ok, Y. S., & Siddique, K. H. M. (2017). Biochar for crop production : potential benefits and risks [Article]. *Journal of Soils and Sediments*, 17(3), 685-716.
- Ippolito, J. A., Cui, L. Q., Kammann, C., Wrage-Monnig, N., Estavillo, J. M., Fuentes-Mendizabal, T., Cayuela, M. L., Sigua, G., Novak, J., Spokas, K., & Borchard, N. (2020). Feedstock choice, pyrolysis temperature and type influence biochar characteristics : a comprehensive meta-data analysis review [Review]. *Biochar*, 2(4), 421-438.
- IUCN, IUCN Global Standard for Nature-based Solutions (2020) First edition
- Jeffery, S., Abalos, D., Prodana, M., Bastos, A. C., van Groenigen, J. W., Hungate, B. A., & Verheijen, F. (2017). Biochar boosts tropical but not temperate crop yields [Review]. *Environmental Research Letters*, 12(5), 6, Article 053001.
- Jia J, Li B, Chen Z, Xie Z, Xiong Z (2012) Effects of biochar application on vegetable production and emissions of N₂O and CH₄. *Soil Sci Plant Nutr* 58(4) : 503–509
- Jiang, M., Huo, Y., Huang, K., Li, M., (2019). Way forward for straw burning pollution research : a bibliometric analysis during 1972–2016. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 26, 13948–13962.
- Kim, M. J., & Kim, B. J. (2000). A bibliometric analysis of publications by the Chemistry Department, Seoul National University, Korea, 1992-1998. *Journal of Information Science*, 26(2), 111–119. doi : 10.1177/016555150002600204

- Kezhen Qian, Ajay Kumar, Hailin Zhang, Danielle Bellmer, Raymond Huhnke(2006).Recent advances in utilization of biochar, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 42
- Lehmann J, Gaunt J, Rondon M (2006) Bio-char sequestration in ter-restrial ecosystems-a review. *Mitig Adapt Strat Glob Change* 11 : 403–427
- Lehmann, J. and Joseph, S. (2009) Chapter 1 : Biochar for environmental management : An Introduction. In : Lehmann, J.andJoseph, S. (eds.), *Biochar for Environmental Management : Science and Technology*. Earthscan Publications Ltd., UK. pp.1-9.
- Levin K (2011) Study Testing Skeptics’ Critiques Reconfirms Basic Climate Science : World Resources Institute Insights. The World Resources Institute, Washington D.C., USA. [https : //climatechangeadaptation.wordpress.com/](https://climatechangeadaptation.wordpress.com/)
- Li, H. B., Dong, X. L., da Silva, E. B., de Oliveira, L. M., Chen, Y. S., & Ma, L. N. Q. (2017). Mechanisms of metal sorption by biochars : Biochar characteristics and modifications [Review]. *Chemosphere*, 178, 466-478.
- Luo, Y., Z. Yu, K. Zhang, J. Xu and P. C. Brookes (2016) The properties and functions of biochars in forest ecosystems. *Journal of Soils and Sediments* 16(8) : 2005-2020
- Majewska T, Mikulski D, Siwik T (2009) Silica grit, charcoal and hardwood ash in turkey nutrition. *J Elementol* 3 : 489–500
- Masulili A, Utomo WH, Syechfani MS (2010) Rice husk biochar for rice based cropping system in acid soil 1. The characteristics of rice husk biochar and its influence on the properties of acid sulfate soils and rice growth in west Kalimantan, Indonesia. *JAgric Sci* 2(1) : 39–47
- Mitchell, J. C. (1969). *The Concept and Use of Social Networks, Social Network in Urban Situation* Manchester, England : Manchester University Press.
- Mostafa, M. M. (2020). A knowledge domain visualization review of thirty years of halal food research : Themes, trends and knowledge structure. *Trends in Food Science & Technology*, 99, 660-677. doi : 10.1016/j.tifs.2020.03.022
- Muhammad S, Lukas VZ, Saqib B, Aneela Y, Avelino N, Muhammad AC, Kashif AK, Umeed A, Muhammad SR, Mirza AM, Ronggui H (2018) A concise review of biochar application to agricultural soils to improve soil conditions and fight pollution. *J Environ Manag* 228 : 429–440

- 
- Nie, C. R., Yang, X., Niazi, N. K., Xu, X. Y., Wen, Y. H., Rinklebe, J., Ok, Y. S., Xu, S., & Wang, H. L. (2018). Impact of sugarcane bagasse-derived biochar on heavy metal availability and microbial activity: A field study [Article]. *Chemosphere*, 200, 274-282.
- Novak JM, Busscher WJ, Laird DL (2009) Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil. *Soil Sci* 174(2) : 105–112
- Noyce, G. L., N. Basiliko, R. Fulthorpe, T. E. Sackett and S. C. Thomas (2015) Soil microbial responses over 2 years following biochar addition to a north temperate forest. *Biology and Fertility of Soils* 51(6) : 649- 659.
- Otte, E., Rousseau, R., (2002). Social network analysis : a powerful strategy, also for the information sciences. *J. Inf. Sci.* 28, 441–453.
- Picone, F., Buonocore, E., Chemello, R., Russo, G.F., Franzese, P.P., (2021). Exploring the development of scientific research on marine protected areas : from conservation to global ocean sustainability. *Ecol. Inform.* 61, 101200.
- Pritchard, A. (1969). Statistical bibliography or bibliometrics. *Journal of documentation*, 25(4), 348-349.
- Qambrani, N. A., Rahman, M. M., Won, S., Shim, S., & Ra, C. (2017). Biochar properties and eco-friendly applications for climate change mitigation, waste management, and wastewater treatment : A review [Review]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 79,255-273.
- Qiu, B. B., Tao, X. D., Wang, H., Li, W. K., Ding, X., & Chu, H. Q. (2021). Biochar as a low-cost adsorbent for aqueous heavy metal removal : A review [Article]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 155, 14, Article 105081.
- Quaiyum MA, Jahan R, Jahan N, Akhter T, Islam MS (2014) Effects of bamboo charcoal added feed on reduction of ammonia and growth of *Pangasius hypophthalmus*. *J Aquac Res Dev* 5 : 6
- Rajapaksha, A. U., Chen, S. S., Tsang, D. C. W., Zhang, M., Vithanage, M., Mandal, S., Gao, B., Bolan, N. S., & Ok, Y. S. (2016). Engineered/designer biochar for contaminant removal/immobilization from soil and water : Potential and implication of biocharmodification [Review]. *Chemosphere*, 148, 276-291.
- Ramanathan, V., & Carmichael, G. (2008). Global and regional climate changes due to black carbon. *Nature geoscience*, 1(4), 221-227.
- Renner R (2007) Rethinking biochar. *Environ Sci Technol* 41(17) : 5932–5933

- Sackett, T. E., N. Basiliko, G. L. Noyce, C. Winsborough, J. Schurman, C. Ikeda and S. C. Thomas (2015) Soil and greenhouse gas responses to biochar additions in a temperate hardwood forest. *GCB Bioenergy* 7(5) : 1062-1074.
- Saggiomo, L., Esattore, B., Picone, F., (2020). What are we talking about? Sika deer (*Cervus nippon*) : a bibliometric network analysis. *Ecol. Inform.* 60, 101146.
- Sagrilo E, Jefery S, Hofand E, Kuyper TW (2015) Emission of CO₂ from biochar-amended soils and implications for soil organic carbon. *Glob Change Biol Bioenergy* 7 : 1294–1304
- Scott, J. (1991). Extended Review : Methods of Network Analysis. *Sociological Review*,39(1), 155-163.
- Shaharudin, M. S., Fernando, Y., Jabbour, C. J., Sroufe, R., & Jasmi, M. F. (2019). Past, present, and future low carbon supply chain management : A content review using social network analysis. *Journal of Cleaner Production*, 218, 629-643. doi : 10.1016/j.jclepro.
- Sharifi, A., (2021). Urban sustainability assessment : an overview and bibliometric analysis. *Ecol. Indic.* 121, 107102.
- Steiner C, Glaser B, Teixeira WG, Lehmann J, Blum WEH, Zech W (2008) Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and char-coal. *J Plant Nutr Soil Sci* 171(6) : 893–899
- Thanuskodi, S. (2010). Journal of Social Sciences : A Bibliometric Study. *Journal of Social Sciences*, 24(2), 77-80.
- Thomas, S. C., and N. Gale (2015) Biochar and forest restoration : a review and meta-analysis of tree growth responses. *New Forests* 46(5) : 931-946.
- Tsay, M. (2011). A bibliometric analysis and comparison on three information science journals : JASIST, IPM, JOD, 1998-2008. *Scientometrics*, 89(2), 591-606.
- Villalba JJ, Provenza FD, Banner RE (2002) Influence of macronutrients and activated charcoal on intake of sagebrush by sheep and goats. *J Anim Sci* 8 : 2099–2109
- Wan, K., Anyi, U., Anuar, N., & Zainab, A. (2009). Bibliometric studies on single journals : a review. *Malaysian Journal of Library and Information Science*, 14(1), 17-55.
- Wasserman, S., & Faust, K. (1994). *Social network analysis : Methods and applications*. Cambridge, UK : Cambridge university press.

- Weixin Zhao, Haizhou Yang, Shufei He, Qingliang Zhao, Liangliang Wei., (2021). A review of biochar in anaerobic digestion to improve biogas production : Performances. mechanisms and economic assessments, *Bioresource Technology*, Volume 341.125797.
- Yang, H. L., Lou, M. F., Liu, P. C., Ni, L. F., Chang, H. Y., & Chen, Y. C. (2009). Trend analysis of nursing intervention studies published by Taiwan nurses association between 1954 and 2006. *The Journal of Nursing Research*, 17(2), 102–111. doi : 10.1097/JNR.0b013e3181a53ea3
- Yu, X. Y., Ying, G. G. and Kookana, R. S. (2009) Reduced plant uptake of pesticides with biochar additions to soil. *Chemosphere* 76 : 665-671.
- Zhang, D., Wang, X., Yuan, X., Yang, L., Xue, Y., & Xie, Q. (2016). Scientific publications in nursing journals from Mainland China, Taiwan, and Hong Kong : a 10-year survey of the literature. *PeerJ*, 4, e1798. doi : 10.7717/peerj.1798
- Zhang, X. K., Wang, H. L., He, L. Z., Lu, K. P., Sarmah, A., Li, J. W., Bolan, N., Pei, J. C., & Huang, H. G. (2013). Using biochar for remediation of soils contaminated with heavy metals and organic pollutants [Article; Proceedings Paper]. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(12), 8472-8483.
- Zimmerman AR, Gao B, Ahn MY (2011) Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils. *Soil Biol Biochem* 43 : 1169–1179
- Zwieten LV, Kimber S, Morris S, Chan KY, Downie A, Rust J, Joseph S, Cowie A (2010) Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant Soil* 327(1/2) : 235–24
- 方世榮、黃恆獎、江季芸 (2005)。產業網絡鑲嵌與網絡動態性演化。關係管理研究，第1卷，第1期。
- 王光旭 (2013)。社會網絡分析在公共政策權力途徑上應用之初探：以全民健保的重要政策事件為例。行政暨政策學報，(57)，37-90。
- 王培蓉、鄭祈全 (2005)。台灣森林經營研究之發展趨勢-以林業試驗所近五十年之期刊論文為例。台灣林業科學 20 (2) : 123-37。
- 王瑞良、許子凡 (2019)。台灣包裝學術研究之文獻計量分析。設計學研究，22 (2)，121-142。
- 王菁姣 (2015)。生物炭对重金属的吸附作用及腐殖酸的影响 (Doctoral dissertation, 北京: 中国地质大学)。

- 
- 王紓愍、劉信宏、游翠鳳、陳嘉昇 (2018)。盤固草生物炭的特性研究與對牧草生長的影响。畜產研究。51(3), 209-216。
- 何光國 (1994)。文獻計量學導論。台北：三民書局。
- 林孟穎、陳財輝 (2017)。生物炭施用於森林土壤之效應。中華林學季刊, 50(4), 309-323。
- 林俊成、王培蓉、詹為巽 (2018)。運用共詞與社會網絡分析探討 2008—2017 年臺灣林學研究期刊重點主題與結構。中華林學季刊, 51 (3), 217-229。
- 林俊成、王培蓉、詹為巽 (2018)。運用共詞與社會網絡分析探討 2008—2017 年臺灣林學研究期刊重點主題與結構。中華林學季刊, 51 (3), 217-229。
- 邱祈榮 (2011)。從哥本哈根協議看林業碳匯之展望。國際農業科技新知, (50), 6-10。
- 邱祈榮、李俊佑 (2018)。千分之四倡議—健康的土壤是氣候變遷及糧食危機的救贖金鑰。林業研究專訊, 25 (3), 68-73。
- 邱祈榮、蔡維倫、林思吟、陳莉坪 (2010)。台灣林業碳匯管理策略探討。中華林學季刊, 43 (2), 277-293。
- 邱英浩、劉陳傳、洪瑞陽 (2020)。以社會網絡分析法探討治理網絡的權力關係與互動模式—以基隆市兩案例為例。都市與計劃, 47 (3), 189-218。
- 陳良駒、張正宏、陳日鑫 (2010)。以特徵詞共現特性探討知識管理研究議題相關性—使用共詞與關聯法則分析。資訊管理學報, 17 (4), 31-60。
- 陳思昀、賴朝明、柯光瑞 (2011)。稻殼生物炭改良劑對土壤性質、碳貯存及溫室氣體排放之影響。臺灣農業化學與食品科學, 49 (3), 131-140。
- 張汝昊 (2020)。基於語意和位置相似的作者共被引分析方法及效果實證。圖書情報工作, 64(8), 111。
- 張華、張甘霖 (2001)。土質指標和評價方法 (1)·土壤, (6)。
- 潘根興、張阿鳳、鄒建文、李戀卿、張旭輝、鄭金偉 (2011)。農業廢棄物炭化轉還田作低碳農業路徑的探討。生態與農村環境學報, 26(4), 394-400。
- 蔡明月 (2005)。引文索引與引文分析之探討。圖書館學與資訊科學。31(1)。
- 蔡佳儒、吳耿東 (2013)。木質材料製備之生物炭應用對植物生長機制之探討。林產工業, 32 (3), 169-178。
- 蔡佳儒、吳耿東 (2016)。臺灣農業廢棄物製備生物炭之未來與展望。農業生技產業季刊, (46), 24-28。
- 蘇國賢 (1997)。產業自主性與市場績效：台灣地區產業結構之網絡分析。《中山管理評論》5 (2): 315-338。