

國立彰化師範大學企業管理學系

碩士論文

車用電池回收發展趨勢之文獻計量
研究分析

A Bibliometric Study on the
Development Trends of Automotive
Battery Recycling

研究生：張緒清

指導教授：張世其 教授

中華民國 114 年 6 月

國立彰化師範大學企業管理學系
碩士論文審定書


車用電池回收發展趨勢之文獻計量研究分析


研究生：張緒清

本論文業經審查及口試合格特此證明

論文考試委員會召集人：

委員：


張世其


江家瑜

指導教授：張世其 博士

張世其

系主任：江家瑜 博士

江家瑜

中華民國 114 年 5 月

摘要

隨著全球電動車產業的迅速擴張，車用電池作為電動車的核心零組件，其回收議題逐漸受到重視。為因應關鍵金屬資源短缺、環境衝擊與產業永續需求，本研究採用文獻計量方法系統性地分析 1995 年至 2025 年間與車用電池回收相關的國際學術研究，探討其發展趨勢、研究主題與學術影響力。研究透過 Web of Science 資料庫進行文獻蒐集，並使用 CATAR 與 RGui 軟體執行概觀分析、書目耦合與共現字分析，建構車用電池回收領域之知識地圖與主題網絡。結果顯示，該領域研究自 2017 年後快速成長主要研究聚焦於鋰離子電池與鈷回收，並以中國、美國、日本等國為主要研究推動。此外，藉由多階段聚類方法辨識出多個核心主題群涵蓋回收技術、政策分析、環境永續與供應鏈管理等議題，展現多元的知識結構。本研究可作為未來研究者掌握車用電池回收研究趨勢之參考依據，亦有助於政府與產業制定更具前瞻性的回收政策與技術發展策略。

關鍵詞：車用電池回收、文獻計量、概觀分析、書目耦合、共現字分析。

Abstract

With the rapid expansion of the global electric vehicle (EV) industry, the recycling of automotive batteries—an essential EV component—has become an increasingly important topic due to concerns over critical material shortages, environmental impact, and industrial sustainability. This study adopts a bibliometric approach to systematically analyze international academic literature related to automotive battery recycling from 1995 to 2025. Data were collected from the Web of Science database and analyzed using CATAR and RGui software to conduct overview analysis, bibliographic coupling, and co-word analysis, thereby constructing a comprehensive knowledge map and thematic network of the field. Results indicate a notable growth in publications since 2017, with major research themes centering on lithium-ion and cobalt battery recycling. China, the United States, and Japan emerged as the leading contributors in this field. Through multi-stage clustering, key thematic areas were identified, including recycling technologies, policy analysis, environmental sustainability, and supply chain management, highlighting the field's interdisciplinary and evolving nature. The findings provide valuable insights for scholars to understand research trends and offer strategic references for policymakers and industries aiming to advance sustainable battery recycling systems.

Keywords : Automotive battery recycling, bibliometric analysis, overview analysis, bibliographic coupling, co-word analysis.

誌謝

這份論文的完成，對我來說是一段成長與挑戰並行的旅程。首先，我要誠摯感謝我的指導教授—張世其老師。從題目的發想、研究方向的確立到每一段寫作的討論，老師都給予我非常實用、直接的建議，也常常鼓勵我多去思考背後的意義。在我卡關時，老師總是適時拉我一把讓我不會陷入迷失。謝謝老師一路以來的支持與陪伴，讓我能順利走到這裡。我也很感謝私立朝陽科技大學的賴副校長，謝謝您願意在百忙之中撥空協助我，提供我許多研究方向上的建議與鼓勵。在這段期間，副校長的學生也就是我的學姊幫了我很多，不論是資料上的協助，還是在我遇到困難時的傾聽與陪伴，總是很有耐心地分享自己的經驗。最後，要謝謝我的家人，謝謝你們在我為了論文忙得焦頭爛額的日子裡，始終給我最大的理解與支持，你們的陪伴和鼓勵，是我持續努力下去的重要動力。

張緒清 謹誌於

國立彰化師範大學企業管理學系

中華民國 114 年 6 月

目錄

摘要	I
Abstract	II
誌謝	III
目錄	IV
表目錄	V
圖目錄	IV
第一章 緒論	1
第二章 文獻探討	7
第三章 研究方法	28
第四章 研究結果	39
第五章 結論建議與研究限制	70
參考文獻	77
附錄	87

表目錄

表 1 為內燃機汽車和純電動車的關鍵金屬總重量比較.....	14
表 2 為詞彙 T 在類別 C 中的出現篇數交叉分析表.....	37
表 3 為兩種分析結果表.....	59

圖目錄

圖 1 研究流程.....	5
圖 2 為多階段主題歸類的示意圖(資料來源: Yeh et al., 2022).....	34
圖 3 為共被引、書目對、共現字關係的示意圖。	35
圖 4 為車用電池回收研究的年度研究數量。	40
圖 5 為車用電池回收研究的三域圖。	42
圖 6 為車用電池回收研究發表統計圖-期刊	44
圖 7 為車用電池回收研究發表統計時間序列圖-期刊	45
圖 8 為車用電池回收研究發表統計圖-作者	46
圖 9 為通訊作者所屬國家與跨國研究合作情形統計	48
圖 10 為車用電池回收領域的論文發表時間序列圖-國家	50
圖 11 為車用電池回收研究的作者所屬機構統計圖.....	51
圖 12 為車用電池回收研究的全球統計圖	51
圖 13 為車用電池回收論文被引用次數統計圖	52
圖 14 為車用電池回收研究的文字雲統計圖	56
圖 15 為車用電池回收研究的主題趨勢圖	56
圖 16 為書目對分析結果.....	60
圖 17 為共現字分析結果.....	61
圖 18 為書目對分析研究多樣性結果	64
圖 19 為書目對分析研究聚類年份分布圖	64
圖 20 為共現字分析研究多樣性結果	69
圖 21 為共現字分析研究聚類年份分布圖	69

第一章 緒論

第一節 研究背景與動機

電動車的歷史比起內燃機汽車的歷史更加久遠，19 世紀時雷蒙-路易·加斯東·普朗忒（法語：Raymond-Louis Gaston Planté）發明最早可以商業化且可充電蓄電的鉛酸電池並用於為車輛供電。在這個時期主要透過馬達及電能供應裝置的互相搭配再將概念應用到車子。市場上開始出現使用電池及馬達作為驅動且可更換電池的電動貨車(Kirsch, 2000)，而且早期消費市場上電動汽車比內燃機驅動車輛有著傳動不需變換檔位和價格低廉等優勢，進而在當時的車輛市場上佔有一席之地。但是隨著石油開採和精煉的技術提升以及內燃機技術的提高，就如同美國福特汽車(FORD)在 1908 年推出 Model T，並引入了裝配線生產方式，大幅降低了生產成本讓當時的汽車不再是有錢人的特權，更是大眾能夠負擔的產品(Mom, 2013)，再加上內燃機汽車的馬力及速度優於電動車，但在 1920 年後內燃機汽車開始佔據整個市場，電動車以及相關的技術發展就此停滯(Kirsch, 2000)。化石燃料作為移動載具的原料開始進入消費者的生活，也帶動內燃機汽車相關技術開始蓬勃發展。

然而在各國日益嚴苛的法令及聯合國淨零碳排的願景驅使之下，政府及企業紛紛開始推出以減少碳排放的措施及車款，也讓車輛的動力單元從

原本的內燃機引擎多了其他種類。為了確認是否達到減碳排的目的，其他研究人員也比較了電動車及內燃機汽車的碳排放及對空氣的影響發現使用電動車可以減少碳排放(Dominković et al., 2018)。此外，據美國能源部的估算指出電動車的溫室氣體排放量約內燃機引擎的二分之一(U.S. Department of Energy, 2021)，雖然這個比率會隨著發電的能源結構的不同而有所改變，但電動車的使用確實可以減少車輛的溫室氣體排放量。再者，根據國際能源總署(The International Energy Agency, IEA)發布的《全球電動車展望》(Global EV Outlook)報告書中，以「油井到車輪」(well to wheel)的基礎來計算，2018 年傳統內燃式引擎車輛(ICE)平均溫室氣體排放量一公里便高於 200 克而純電動車(BEV)約 95 克(International Energy Agency, 2020)，也因此電動車的大量使用成為了各國在面臨碳排壓力下的解方之一。

電動車正以一股難以想像的速度在席捲整個汽車產業，各家車廠也紛紛推出電動車以展現自家車廠的技術力及對於減少碳排放的追求。隨著電動車的興起，2017 年全球電動車銷量首度突破百萬輛(IEA, 2018)。根據國際能源總署(IEA)在 2024 年 4 月份所發布的《2024 全球電動車展望》(IEA, 2024)中指出 2024 年電動車銷量比起 2023 年的大約 1400 萬輛將會高出約 1.2 倍達到 1700 萬輛。在電動車的價值鏈中最被廣為關注的是電池，至今為止也受到許多研究人員的關注並且已經發展出許多種類的電池(e.g., Manzetti & Mariasiu, 2015 ; Dhameja, 2001 ; Young et al., 2012)。

但是在電動車被全球消費者廣為接受的同時也帶來一些隱憂如 Manzetti & Mariasiu (2015)指出對電池的生命週期和使用情況的分析顯示電池經常與污染和環境負擔相關。Harper et al., (2019)指出如果僅考慮主要的兩種生產模式，產出 1 噸鋰需要 250 噸鋰輝石(Spodumene)或者 750 噸富含礦物質的鹵水，並且大量的原料加工會對環境造成相當大的衝擊及影響 (Katwala, 2018)。此外，研究說明每年所生產的 2000 萬顆電池中鈷的需求大約等於目前世界鈷礦儲量而且很有可能在未來的 60 年內耗竭(Delucchi et al., 2014)。從以上的論述可以看出探討電動車電池回收技術的必要性。所以，回收報廢電池以減緩現在對於電池的原物料的過度依賴勢在必行。

綜合歷史與現況來看，雖然電動車的發展早於內燃機汽車，但由於技術限制及化石燃料的興起一度沉寂。然而，面對當前全球減碳壓力與永續目標，電動車再次成為焦點並迅速重塑汽車產業。隨著各國政策推動與電動車銷量的穩定成長，電池作為電動車的核心理其重要性日益增加。儘管電動車有助於減緩溫室氣體排放，但其背後所依賴的電池原物料開採與製造過程仍伴隨重大的環境風險。因此車用電池回收的研究與發展不僅是實現電動車永續的關鍵，也有助於減緩資源枯竭與環境衝擊，也是現今不可忽視的重要課題。

第二節 研究目的

綜合上述研究背景與動機，本研究探討車用電池回收之研究分布及趨勢、主題及影響力探討，使用 RGui 軟體概觀分析並將結果視覺化，同時使用文獻探勘工具 CATAR 進行書目對及共現字分析結果。

為了更全面的檢視車用電池回收的創新領域，本研究首先透過 Rgui 概觀分析了車用電池回收的研究文獻，探討各期刊之間的影响力以及關於此議題研究的分布等，提供企業及學界對於車用電池回收研究的參考指標。其次，本研究透過 CATAR 執行書目對分析探討車用電池回收研究的知識結構，並透過共現字分析探討車用電池回收相關研究的主題關係，最後本研究整合書目對及共現字分析，以更全面的視角了解研究趨勢及關鍵主題並給出建議。因此，本研究將研究目的列點說明，其說明如下：

- 一、探討車用電池回收研究的分布與發展、知識與趨勢發展、影響力分析等。
- 二、探討車用電池回收研究的書目對分析與共現字分析以了解領域之知識結構與主題關係。

第三節 研究流程

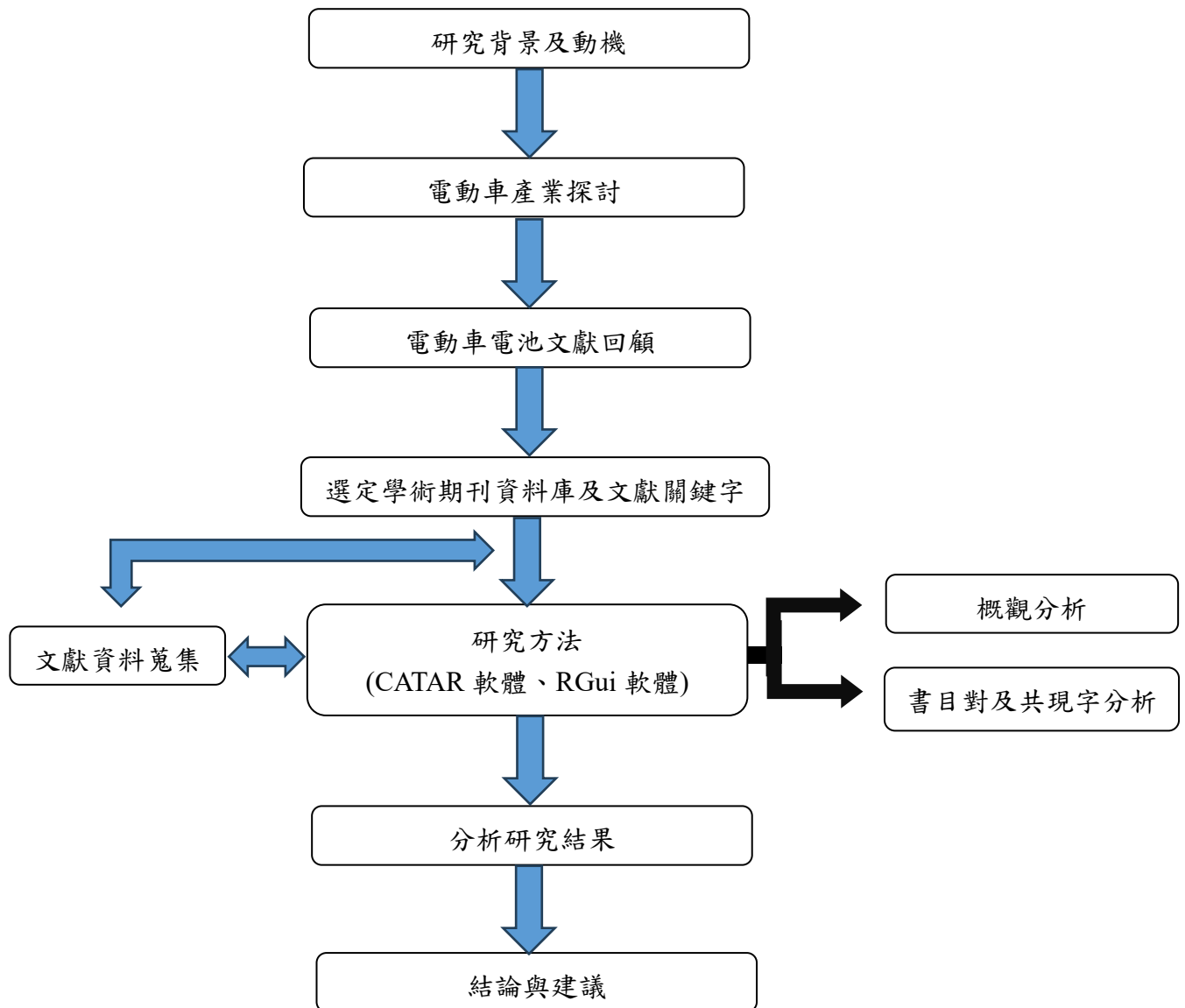


圖 1 研究流程

經過研究背景及動機了解車用電池回收研究的必要性後，發現車用電池範圍廣大，其中包含機車及汽車又或者第一節提及最早的電動貨車皆使用鉛酸電池。然本研究之文獻回顧聚焦於最為廣泛使用車用電池之電動車產業進行探討及文獻回顧以深入車用電池的核心。透過資料庫的比較之後，將從文獻回顧中蒐集的車用電池回收的研究關鍵字，運用 Web of Science 資料庫進行資料蒐集並透過文獻計量工具 CATAR 及 Rgui 進行概觀分析及書目對、共現字研究，最後了解車用電池回收相關研究並給出結論與建議。

第二章 文獻探討

第一節 電動車

回顧電動車的歷史經歷了許多的波折，經過科學家以及物理學家們的多方嘗試後，在 1832 年到 1839 年之間 Robert Anderson 發明了第一輛由不可充電電池供電的原型電動馬車。接著，不同的原型電動車被不斷改良及發明，但在當時礙於技術無法突破，以至於不適合實際的開發及大量製造 (Guarnieri, 2011)。在此之後的 1856 年至 1881 年間，得力於 Werner von Siemens 等人以及 Raymond-Louis Gaston Planté 開發出高效率的直流電電動馬達以及鉛酸電池，使得電動馬達以及充電電池的技術得以整合應用。1908 年亨利福特推出 Model T，並引入了裝配線生產方式，大幅降低了生產成本，再加上內燃機汽車的技術得到改良；此外，在燃料方面與電動車相比，廉價的汽油供應導致汽車在當時的使用成本更低，在里程距離上電動車的行駛距離相對較短並且充電站非常有限 (Yong, 2015)。因此，電動車不再受到歡迎，也正式開啟了內燃機的時代。電動車的發展及技術研發陷入停滯。

然而現今在各國日益嚴苛的法令及聯合國淨零碳排的願景驅使之下，政府及企業紛紛開始關注電動車的發展，尤其是在 1970 年代初期的石油危機促使美國政府也開始對電動車進行測試 (Situ, 2009)。因此，為了要因應各種使用環境所開發出了不同動力系統的電動車。Tuffour & Ewing (2024) 整

理及介紹了電動車不同的動力系統，從在使用期間完全不需要化石燃料的純電動車(Battery Electric Vehicle, BEV)，完全依靠可充電電池中儲存的電力運行的車輛，也因為在運行的時候完全不需要使用到化石燃料，所以能夠達到沒有排放廢氣的目標，但也因為只能插入電源為電池充電的緣由，所以車輛的行駛里程受限於電池的設計。為此，插電式混合動力車(Plug-in Hybrid Electric Vehicle, PHEV)同時配備電動馬達和汽油引擎，可以透過插入電源為電池充電，也可以使用汽油作為備用燃料來源，為不同的使用環境提供靈活性。油電混合車(Hybrid Electric Vehicle, HEV)配備內燃機引擎和電動馬達，但無法插入電源為電池充電，而是透過再生煞車和內燃機引擎為電動馬達所使用的電池充電。燃料電池電動車(Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV)使用氫燃料電池發電，為電動馬達提供動力且僅排放水蒸氣和熱量，也因為只需要加氫而不需要使用化石燃料使其成為零碳排放車輛。最後，增程式電動車(Extended Range Electric Vehicle, EREV)與 PHEV 類似，配備燃油引擎但是燃油引擎用途只為電池充電，所以配有更大容量的電池，使其能夠在需要汽油引擎充電之前純靠電力行駛更遠的距離。在企業及政府的投入下，時下的電動車不再只有單一的動力系統，更可以讓消費者依照自身需求以及不同的使用環境選擇適合自己的車款。此外，根據 IEA 在 2024 年 4 月份所發布的《2024 全球電動車展望》(IEA, 2024)中指出電動車的銷量將達 1700 萬輛，佔全球汽車總銷量的五分之一以上；除了政府在政策上

的推動扮演重要角色外，IEA 在報告中更認為電動車的轉型變成大眾普遍對於個人載具選擇的速度取決於價格及消費者對其的可負擔能力。就 2023 年而言，全球電動車銷量雖然目前需求仍然集中於中國(60%)、美國(25%)、歐洲(10%)，但新興經濟體如越南、泰國及印度等在電動車銷量上有所增長且具有成長的潛力。

在電動車銷量成長背景下電動車的價格戰悄然開打，特別是在中國電動車的價格逐漸下降，因此 IEA 預估中國已經有超過 60% 的電動車價格已經低於其內燃機車型。另外，IEA 認為另一個敲響價格戰的因素是電池原料 2022 年電池金屬的市場動盪導致鋰電池組的價格首次上漲，比 2021 年貴 7%。然而 2023 年製造電池的主要金屬價格下跌，導致電池組價格下降近 14%，電動車的電池成本也正因為產業的創新以及新技術的引進不斷的下降也間接影響電動車的售價，讓減少來自交通碳排的通勤選項不再需要付出高昂的代價。

現今消費者面對多樣化的電動車動力選項及日益親民的價格，使得電動車成為兼顧環保與實用性的交通工具選擇。特別是在中國、歐洲及美國等主要市場帶動下，加上新興經濟體的快速成長，全球電動車市場正以驚人的速度擴張。然而，在電動車快速成長的背後，電池扮演著核心的技術關鍵。不僅關係到車輛性能與續航力更與車輛製造成本、資源使用以及環境永續密切相關。因此，下一節將聚焦於電動車電池的電池技術、種類差

異與背後所面臨的資源與環境挑戰。

第二節 電動車電池

壹、電動車電池類型比較

Manzetti & Mariasiu (2015)整理了所有發展至今的電動車電池類型以及詳細的性能狀態。目前電動車電池類型被汽車公司廣泛接受的類型有鉛酸電池(Lead-Acid)是目前全球使用歷史最悠久的電池類型。這種類型電動車電池的主要缺點包括需要處理酸性物質、電池的結構中含有鉛元素以至於可能會對於環境造成危害、以及低儲能體積比以及儲能重量比。然而，鉛酸電池因為製造技術成熟且成本較低，加上其電功率/重量比不差，因此仍是電動車電池的選項之一。第二種電動車電池類型為鎳鎘電池(Nickel-Cadmium, NiCd)其擁有所有電池種類中較高的使用壽命。然而，它的主要缺點是電池中使用鎘重金屬，對環境、人體及動物健康有害，因此受到許多法規限制，並且能量密度低於鋰電池。另外，還有另外一個為人所熟知的特性-記憶效應(memory effect)，據 Shukla et al., (2001)的研究指出鎳鎘電池電池會受到「記憶效應」影響，意旨當電池長期反覆進行淺度充放電循環，且幾乎沒有過度充電的情況下，電池的放電電壓與容量將顯示出明顯降低，並出現容量衰減的現象。第三種電池鎳氫電池(Nickel-Metal-Hydride, NiMH)電池的製造原理與鎳鎘電池類似，但最大優勢是在充電過程中無記憶效應，不會因不完全放電而降低最大容量。然而，與鋰離子電池相比，鎳氫電池電池容量較低，且自放電率較高意旨電池在不使用的情況下電池電

量會自己下降的程度較高。第四種鋰離子電池 (Lithium-ion, Li-ion) 具有高能量密度與較佳的能量密度/重量比，成為電動車市場上常用的電池，但是也有缺點包括：成本偏高、在特定條件下易過熱的安全問題，以及仍有一定的壽命限制，所以需要良好的電池管理系統(Battery Management System, BMS)。第五種鋰離子聚合物電池(Lithium Polymer, Li-Po)比傳統鋰離子電池具有更長的生命週期，但在過載和電池放電低於一定值的情況下會表現出功能不穩定，所以如同鋰離子電池需要良好的電池管理系統。最後鈉-氯化鎳電池(Na₂NiCl₄)也稱為“斑馬電池”，工作溫度為 270 – 350°C 的熔鹽電解質且具有儲存能量密度高的優點，主要缺點與其操作安全性和長期處於高溫狀態影響儲存時間有關。而 Mohammadi & Saif (2023)指出汽車製造商正在投資並尋找成本低廉且可靠的電池，該研究更指出鉛酸電池、鎳氫電池和鋰離子電池，由於其良好的經濟效益、能量密度和生命週期，在電動車產業中佔據主導地位，更何況有關於電池的研究不論是一次電池或蓄電池都獲得發展。在文章中，該作者針對電動車所使用的三種主要電池鉛酸電池 (Lead-Acid)、鎳氫電池 (Nickel Metal Hydride, NiMH) 與鋰離子電池 (Lithium-ion)進行了比較與分析，涵蓋其技術特性、市場趨勢與未來前景。

首先，鉛酸電池是歷史最悠久且最廣泛使用的可充電電池之一，尤其因為其低成本、製造容易以及在極端溫度下仍有不錯表現等特性，被廣泛應用於汽車啟動電源、不斷電的備援系統中。然而其重量大、能量密度低

與壽命有限使其在高續航里程需求的純電車中逐漸被替代。鉛酸電池的自放電率低且過度放電易導致性能衰退。儘管如此，由於其價格便宜且具備成熟製造技術，仍在低價市場與重視初期成本的應用中具有優勢。

鎳氫電池相較於鉛酸電池提供更高的能量密度，且具有較佳的耐久性，長期以來被廣泛用於混合動力車。其壽命循環數高於鉛酸電池，但需定期進行充放電循環，如電池為新的或長期沒使用需要進行充放電循環。不含有毒重金屬鎘，環保性優於鎳鎘電池，成為過渡至鋰電池技術的重要階段。然而，因其比能低於鋰離子電池，限制了其在續航需求高的純電車領域的發展。雖然目前仍在某些 HEV 應用中維持使用，但市場份額逐漸被鋰電池侵蝕。

鋰離子電池則是目前 EV 應用中最具發展潛力的電池技術。它擁有最高的能量密度、最快的充電速度、最長的壽命循環以及最低的自放電率。此外，鋰電池無需定期維護，該技術也持續在化學材料（如磷酸鐵鋰、鎳錳鈷三元）與製造工藝上創新，進一步提升經濟效益。鋰電池的市場價格自 2010 年以來已大幅下降進一步推動 EV 普及化。

從整體比較來看，鉛酸電池雖然價格低廉，但技術性能較差；鎳氫電池則在成本與性能之間提供折衷選項，但發展潛力受限；鋰離子電池則憑藉其優越的能量密度與技術成熟度，成為電池市場的主流與未來重點。儘

管鋰電池目前成本仍高於鉛酸與鎳氫電池，但隨著技術進步與規模化生產，其價格將持續下降，使其在成本與性能的綜合表現上具備壓倒性優勢。

貳、電動車電池的環境影響

電動車電池對環境的影響可以從兩個面向說明。

一、原料開採與資源供應鏈的挑戰：

Niri et al. (2024)列出製造電動車電池組所需的金屬礦物成分，說明典型的電動車比起內燃機汽車需要更多的礦物金屬，特別是電池組的製造。除此之外，Iglesias-Émbil et al., (2020)比較了電動車比起內燃機汽車需要更多的礦物金屬，表 1 顯示了用於製造典型內燃機汽車和三種不同純電動車的關鍵金屬總重量；可以看出不同電池型號的電動車所需的礦物金屬總重皆高於內燃機汽車。

表 3 為內燃機汽車和純電動車的關鍵金屬總重量比較

（資料來源：Iglesias-Émbil et al., 2020）

車輛類型	ICEV	BEV-NMC		
		BEV-333	BEV-622	BEV-811
The total weight of metals (kg)	179.40	336.22	330.90	320.93
附註： 1.Li、Co 和 Ni 不用於 ICEV 的生產。 2.NMC 顯示了電動車電池陰極中鎳、錳和鈷之間的化學比 (3:3:3/6:2:2/8:1:1)。 3.金屬包括 Al、Cu、Pb、Zn、Cr、Mn、Ni、Co、Li 等。				

面臨巨大的原料壓力下採礦作業將可能面臨環境和社會風險，特別是在政府無力保護的社區和環境易受破壞的地區。許多的礦區往往會有涉及勞工工作安全、環境破壞等風險存在(Lèbre et al., 2020)(IEA, 2021)如鈷的最

大出產國-剛果民主共和國(Elkind et al., 2020)。一些研究認為電動車普遍使用的鋰電池製造時會產生環境及社會影響，例如提取鋰離子的過程中可能會污染供水。然而，地球上超過一半的鋰皆來自「鋰三角區」該地區橫跨了智利、阿根廷以及玻利維亞屬全球較為乾燥的地區之一，鋰礦的開採更是消耗了該區 65%的水資源；該研究更指出鈷的開採會帶來有害的物質，將會危害環境；例如鈷的礦場中往往含有硫，在遇到空氣及水之後就會化成硫酸滲透到當地的自然環境進而造成影響(Lybbert, 2021)。一些研究指出關鍵金屬的開採(如:鋰、鈷)會為當地帶來人權、土地爭議甚至環境污染等問題(Porzio & Scown, 2021)(Peters et al., 2017)。根據自然資源治理研究機構的報告指出(Natural Resource Governance Institute, NRGi)，政府及產業界應該共同探討更容易的拆卸、回收以及再利用的電池，以至於能夠達成標準化的重新組合及回收(Elkind, 2020)。

二、電動車電池的耗能與碳足跡

一些研究指出電池的生產需要使用大量能源，其中包含電池的生產及組裝(Yuan et al., 2017；Shafique et al., 2022)。此外，在電池製造的過程中，有許多的製造流程將會帶來大量的能源消耗。Peters et al., (2017)的研究指出平均而言，所有電池化學種類的電池生產平均累計能源需求(CED)和溫室氣體(GHG)排放分別為每千瓦時(kWh)的儲存容量需要 328 千瓦時(kWh)和 110 公斤/二氧化碳(kg CO₂eq)。Kim et al., (2016)使用了福特(FORD)的車型

Focus 的純電車款的數據評估其 24 kWh 容量的鋰電池發現開始生產到出廠的溫室氣體排放量相當於 3.4 噸 CO₂-eq，或每千瓦時產生 140 公斤 CO₂-eq 或每公斤電池產生 11 公斤 CO₂-eq，其中電池生產的所有過程中，電池製造佔溫室氣體排放量的 45%；該研究亦指出該款電池每公斤的電池需要 1.2 億焦耳來生產。因此，研究人員發展出降低電動車電池對環境影響及能源消耗的方法，如 Al-Shroofy et al., (2017)研究使用無溶劑的乾粉塗覆法取代傳統製造電動車電池的濕漿法，經評估後發現使用無溶劑乾粉塗覆法比起濕漿法更環保且耗能較少。另外，Vogt et al., (2022)研究了電動車電池中為了確保電池內的低濕度環境，所配備的電池組乾燥系統(Heating, ventilation and air conditioning, HVAC)；根據該研究中的案例研究結果說明，可以透過改變 HVAC 系統組件的設計，每年可以減少 7.4%的能源消耗。

然而，為了要讓電池的製造的過程減少碳排放，各國政府更是祭出各種管制及激勵措施。如美國的能源部提出的報告指出美國的降低通貨膨脹法案(IRA) (U.S. Department of Energy, 2023)透過對再生能源的投入進而減少電動車在使用期間所產生的間接碳排；此外，歐盟提出的碳邊界調整機制(CBAM)對於碳密集型產品，進口商需要報告產品相關溫室氣體排放量等措施以限制碳排放量(European Commission, 2023)。

最後，Niri et al., (2024)的研究指出可以將數位電池護照引入到整個電池價值鏈中。數位電池護照可以提供該電池相關的資訊包含 ESG 指標、原

料、成分、拆卸方式等，可以幫助所有電動車電池價值鏈的參與者獲取所需資訊（如：回收方法、拆卸說明），並且電池護照提供的可追溯性可能迫使電動車電池的製造商製造負責任的產品(Berger et al.,2023)。

電池價格方面目前為止中國仍然提供最便宜的電池，但隨著電池成為全球化商品各地區價格將趨於一致。在未來技術創新仍然重要 IEA 指出如鈉離子電池的成本可能比鋰電池低 20%，且不需要使用鋰；又或者鋰磷酸鐵鋰電池比鋰、鎳、錳和鈷氧化物電池便宜得多，以上原因都將影響民眾對於車輛選擇的轉型速度，同時影響電動車銷量(IEA, 2024)。IEA 在 2024 年所發布的《2024 全球電動車展望》指出電池回收產業正在為未來做好準備。目前電池回收能力在 2023 年達到 300GWh，預計到 2030 年可能超過 1500GWh，其中 70%將來自中國。不過從 2030 年下半年開始，隨著電池逐漸報廢淘汰，回收的需求預估將大幅增加(IEA, 2024)。電池回收的需求正在擴大的前提下，電池回收相關的技術領域創新也正在跟上腳步，回收方法也從原本的濕式冶金及火法冶金不斷的發展出符合各種回收情境且多元的回收方法。

電動車電池的應用及發展，無論是在種類選擇、性能擴充還是在環境永續與成本控制上有創新及多元的選擇。尤其鋰離子電池的廣泛使用，不僅推動了電動車技術進步也引發對原料開採、碳足跡及製造過程環境負荷的關注。環境方面電動車電池雖然有助於減少運行階段的碳排放，但從原

料開採到製造、使用乃至報廢所涉及的耗能與環境衝擊仍不容忽視。特別是關鍵金屬如鋰、鈷等其中供應鏈面臨人權問題、社會與生態風險。促使政府與產業應積極推動碳管理政策、再生能源使用及製程創新，例如乾粉塗覆技術與 HVAC 節能設計。同時數位電池護照的導入有助於提升價值鏈的透明性。面對快速成長的電動車市場與逐漸報廢的大量電池，電池回收已成為不可忽視的議題。如何在資源有限與環境壓力加劇的背景下建立有效且可持續的電池回收體系，是未來電動車產業轉型的挑戰。因此，下一節將聚焦於電動車電池的回收方法探討現行主流的回收技術與其中的優劣勢、應用範疇以及未來的創新方向，並進一步說明回收方法及技術在推動電動車永續發展中所扮演的角色。

第三節 電動車電池回收方法

現今車用電池的回收已經發展出許多不同的回收方法其中各有優缺點，Harper et al., (2019)整理且分析了近年電池回收的方式及其優缺點同時詳細說明了新興的車用電池的回收方式。

壹、火法冶金(Pyrometallurgy Recovery)

火法冶金透過高溫熔爐將金屬氧化物的成分如鈷、銅、鐵、鎳等還原。火法冶金已經是消費性電子產品中鋰電池常用的回收方法，因為該方法通常可以針對整個電池組直接進行回收，而不需要精細的分類電池原料，再搭配其他回收方法提供了回收的靈活性。因為這種方法在封閉的熔爐中，所以相關的安全風險僅會發生在封閉的環境中。但也因為需要在高溫的熔爐進行回收進而造成大量能源消耗，也因為方法的限制導致回收效率不佳。儘管如此，火法冶金仍然是常用的提取高價值的金屬如鈷、鎳，Georgi-Maschler et al., (2012)說明鋰電池火法冶金的回收中，沒有辦法有效的回收鋰而存於爐渣之中需要額外處理、研磨等。

貳、濕式冶金(Hydrometallurgical metals reclamation)

濕法冶金是利用水溶液從電池的陰極材料中浸出目標金屬的回收方法。最常見的溶劑組合是 $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2$ (Ferreira et al., 2009)。濕法冶金比起火法冶金回收率較高能夠回收的金屬種類也較多，也不需要像火法冶金需要維

持在高溫才能進行回收以致於所需的能源需求也較低。除了回收金屬外，還可直接再製作陰極材料，如 NMC-111，減少原材料需求，支援電池的再製造和重複使用，所以更有可能實現閉環回收(Close-loop)，意旨將產生的廢料或消費後的廢棄物回收，重新生產成相同的產品，進而供應下游企業或終端消費。但是由於需要使用溶劑進行回收，所以需要花費額外成本處理廢棄溶劑，甚至可能處理不當造成環境影響。

參、物理性材料分離(Hydrometallurgical metals reclamation)

物理材料分離技術利用材料的物理特性差異(如密度、磁性和疏水性)來分離電池中的各種材料。操作上簡單且因使用的篩網、磁力設備、重力分離設備和泡沫浮選設備的技術皆成熟且適用於多種電池類型，成本低並已廣泛應用於礦業和資源回收。除此之外，更不需要化學溶劑及大量的能源消耗，也不會產生廢水及廢棄較為環保。但仰賴物理特性所以難以適用於興致差異大的材料。

肆、直接回收(Direct Recycling)

直接回收是指直接去除電極材料，經過修復後重新用於電池的製造，而不需要將其分解為原始金屬成分，此類的回收方法主要集中在筆電型電腦和手機電池上(Chen, et al., 2017)。直接回收還能夠回收幾乎電池內的所有組件，無論電池的負極類型如何，都能夠透過直接回收進而產生價值；然而，回收後材料的電池性能是否與原材料一樣存在問題，這可能會對電

池功率和壽命產生影響，因此製造商可能不願意購買回收化合物，所以回收後的材料僅能夠應用於對性能沒有嚴格要求的應用(Gaines, 2014)。

肆、生物金屬回收(Biological metals reclamation)

生物金屬回收指利用生物技術如:細菌的代謝活動來提取金屬，這種回收方式目前已經廣泛用於採礦業(e.g., Karimi et al., 2010; Smith et al., 2017)，也是適用於從低品位礦石中提取金屬、礦石或煤炭的選礦、有毒金屬的去除、廢料中回收金屬等(Pollmann et al., 2018)。此回收方法主要用於鋰離子電池回收的新興技術，亦可以對火法冶金及濕式冶金兩種回收方法提供額外的補充(Xin et al., 2016; Horeh, 2016)，特別是鈷和鎳很難分離，需要額外步驟。然而，Harper et al., (2019)也指出該領域的研究相對較少，可以著重該領域未來發展的機會。

綜上所述電動車電池的回收技術發展迅速，主要包括火法冶金、濕式冶金等方式。各方法皆有其優勢與限制，例如火法冶金適用性廣但能耗高、濕式冶金回收率佳但需處理化學廢液，而物理性材料分離與直接回收則兼具低能耗與環保潛力，生物金屬回收則作為未來發展的新興技術。隨著電池產量與退役數量的增加，如何選擇最合適的回收方式並在環保與經濟效益間取得平衡已成為產業與政策制定者的重要課題。鑒於電動車電池相關技術與議題日益受到重視且文獻數量快速增長，透過系統性的文獻計量分

析可協助研究者釐清研究脈絡、掌握關鍵主題與發展趨勢。因此，下一節將進行文獻計量研究的文獻回顧，以作為後續研究的依據。

第四節 文獻計量研究

壹、書目耦合(Bibliographic Coupling)及共被引(Co-citation)分析

Kessler (1963)提出書目耦合(Bibliographic Coupling)的概念並對文獻進行分析發現文獻之間具有相關性。書目耦合與共被引(Co-citation)之間的關係密不可分，但是兩者仍具差異。舉例來說，書目耦合指文獻 A 和文獻 B 皆引用文獻 C，則文獻 A 和文獻 B 存在耦合關係，可稱文獻 A 和文獻 B 為書目對(Bibliographic Coupling)。自 1973 年 Small (1973)發展「共被引」(Co-citation) 的概念。舉例來說，共被引指文獻 A 和文獻 B 的兩篇文獻被後來出版的文獻 D 所引用，則文獻 A 和文獻 B 稱為共被引(Marshakova, 1973 ; Small, 1973)。共被引的分析方法在當時屬於新興衡量文獻之間關聯性的方法，在 Small (1973)研究中則使用 Science Citation Index (SCI) 試圖通過量化的方式繪製出科學領域的結構和知識網路。張嘉彬 (2016)的研究說明書目耦合和共被引的文獻計量研究皆是透過第 3 篇文獻對於既存的兩篇文獻之間關係建立關聯性，差別在於書目耦合是將引用文獻作為主體進行聚類(clustering)，共被引則是將被引用文獻作為聚類的主體。Sharabchiev, (1989)針對免疫學領域對 SCI 資料庫中的科學文獻分析並比較了兩種分析方法發現共被引分析所呈現的知識網路較佳，因此，張嘉彬 (2016)認為若針對科學計量學(Scientometrics)的領域研究，共被引分析將會是比較好的分析方式。

根據 Persson (1994)透過 1986 年到 1990 年之間 *Journal of the American Society for Information Science* 的文獻探討資訊科學領域內的知識研究分別透過書目耦合及共被引的兩種分析方式進行，研究結果發現兩者方式所繪製出的知識網路大致吻合，但 Jarneving (2005)對上述兩種方式針對環境科學領域內的文獻進行了比較，兩種方式所繪製出來的地圖不盡相同，因此需要更多研究人員的投入及比較。然而，Huang & Chang (2015)的研究透過探討 2000 年至 2009 年間的有機發光二極體（Organic Light-Emitting Diode, OLED）的研究前沿及脈絡同時比較了書目耦合以及共被引的分析方法，發現兩種方法都能夠了解並繪製知識結構及網路關係，但相較之下書目耦合較能夠找到更多、更早且重要的知識前沿。

貳、共現字分析(Co-word analysis)

隨著科學文獻在半個世紀內大幅增加，研究人員面對過去傳統依賴專家意見所繪製的知識網路及關聯面臨巨大的挑戰，進而發展出文獻計量學的各種方式。隨著文獻的增加，研究人員開始結合不同的文獻分析模式，試圖以更全面的角度了解專業領域中的知識網路及關聯。自 1986 年 Callon (1986)提出共現字分析的行動者網路理論(Actor Network Theory, ANT)作為理論基礎，再結合實例加以說明。然而。共現字分析的方法傳播到了法國、英國等地。Law et al., (1988)將共現字分析應用到了環境酸化的相關政策研究，後續 Law & Whittaker (1992)以環境酸化研究驗證了共現字分析的可靠

性。共現字分析指則是指透過兩篇文獻中使用相同詞彙的頻率，以了解兩篇文獻主題之間的關聯性，在其分析中包含指數(Inclusion Index)和近鄰性指數(Proximity Index)是用來衡量詞與詞之間的關聯強度的指標。這些指標可幫助研究者判斷兩個詞在文獻中出現的頻率和它們之間的關係緊密程度。包含指數衡量的是當一個詞出現時，另一個詞是否也出現並且考慮了兩個詞的單獨出現頻率。例如，在研究電動車的文獻中，可能會發現「電池」和「能量密度」的包含指數較高，說明在提到「電池」時，通常也會出現「能量密度」的討論。而近鄰性指數用於衡量兩個詞在文獻中的「接近程度」。與包含指數不同，近鄰性指數著重於兩個詞是否在物理位置上靠近（如在摘要、標題或段落內共現）。這個指數不僅考慮它們的共現次數，還考慮它們之間的距離。例如，當分析有關供應鏈管理的文獻時，「供應商」和「物流」可能會出現在相鄰的段落中，這時近鄰性指數就會較高，兩項指數皆介於 0~1 之間。包含指數強調包含並用於了解主要主題及其具體的子主題，近鄰性指數強調關聯性與弱連結則用於看出周邊但重要的次要主題。

He (1999)回顧共現字分析的發展歷程、理論基礎和應用範圍，以及在文獻計量學中所扮演的角色。共現字分析通過文獻中詞語的共現關係，能夠了解研究領域的核心主題、關鍵子領域及其關聯，發現新的研究趨勢和主題。從早期的索引詞擴展到標題、摘要，甚至全文中的詞語，這使得共現字分析更為全面和準確。如: Sharabchiev (1989)結合了 Small (1973)以及

Kessler(1963)的分析方式繪製了以免疫學為題的知識網路。Ding et al., (2001)的研究繪製了 1987 年至 1997 年期間的科學引文索引(SCI)和社會科學引文索引(SSCI)針對資訊檢索領域(Information Retrieval)的文獻，同時應用多向度分析(Multidimensional Scaling, MDS)繪製出領域及集群的趨勢。Ritzhaupt et al., (2010)將共現字分析應用到遠距教育領域對 1987 年至 2005 年兩個期刊進行共現詞分析結果發現該領域缺乏一致且集中的研究。除此之外，共現字分析也應用在預測趨勢上，如 Assefa et al., (2013)針對 STEM(Science, Technology, Engineering, and Mathematics)教育領域了解核心知識領域以及新興的知識結構，以提出包括課程開發、政策形成、專業發展和資源管理等建議。綜上所述，共現字分析可以了解特定專業領域的主題及其集群之間的關係，更可以了解專業領域內主題的發展趨勢同時應用於各種科學領域。

總結來說文獻計量分析方法如書目耦合、共被引分析與共現字分析，皆為了解學術領域內知識結構與主題演進的重要工具。書目耦合與共被引分析雖以不同視角描繪文獻間的關聯，但皆能呈現學科領域的知識網絡，並對核心文獻與研究前沿提供辨識。共現字分析則藉由詞彙間的共現關係，以了解主題聚類與研究趨勢，進一步幫助研究者理解學術對特定議題的關注焦點與方向。上述的方法不僅在理論探討上具深厚基礎，亦已廣泛應用於多個科學與技術領域。因此，為更深入探討電動車電池回收領域的知識

演進與研究趨勢，並建構該領域的知識地圖，接下來將說明本研究所採用之研究方法與分析架構，藉由文獻計量學工具進行系統性的資料蒐集與分析以作為本研究後續分析的基礎。

第三章 研究方法

第一節 研究架構

本研究首先了解車用電池的背景並定義研究目的及問題，接著針對車用電池相關領域進行文獻探討，並在本章將比較不同學術索引資料庫的差異進而選擇資料來源，從而針對車用電池回收相關文獻制定檢索關鍵字及檢索策略進行資料蒐集及建立資料集 Ω 。接著定義文獻資料來源的篩選規則並依照核心主題、相關技術及其他設定並分類關鍵字，最後說明本研究欲使用的分析工具。資料分析方面使用 CATAR 文獻探勘工具進行書目對及共現字分析，並且使用 RGui 軟體進行概觀分析。

首先透過概觀分析探討車用電池回收相關的研究期刊、作者、國家等資料以探討本研究主題之發展趨勢。接著透過文獻探勘工具對文獻資料集 Ω 獻探勘工具進行書目對分析及共現字分析了解兩種分析中不同主題群之間的關聯性及知識結構，再結合兩種分析探討不同分析所得出主題群並給出結論及建議。

第二節 資料來源

Zhu & Liu (2020)指出 Web of Science (WoS)資料庫包含 Science Citation Index Expanded (SCIE)、Social Sciences Citation Index (SSCI)和 Arts and Humanities Citation Index (A&HCI)並被學術界廣泛使用。Zhu & Liu (2020)在同一份研究中說明了 Scopus 身為後進者更成為了 WoS 的競爭對手。然而，許多學者也針對兩個資料庫投入了研究，如 Abdulhayoglu & Thijs (2018)透過新興的演算法比較了兩種資料庫，發現兩者存在高度重疊。

然而，根據 Adriaanse et al., (2013)的研究比較了 WoS、Scopus 和 Google Scholar，研究結果發現總引用次數上，WoS 檢索到的引用結果最多，其次是 Google Scholar 最後是 Scopus；此外，WoS 在期刊樣本整體涵蓋的方面最佳。另一項研究(Harzing & Alakangas, 2016)則認為 Google Scholar 提供了最全面的檢索覆蓋範圍，並且 WoS 和 Scopus 的覆蓋範圍相似，但同一份研究也說明 Google Scholar 沒有強大的品質控制流程，只是簡單地抓取學術相關網站上提供的任何資訊且有可能會出現重複的文獻或者是出現重複的文獻中僅有微小的改變等問題。Martín-Martín et al., (2018)的研究亦認為要謹慎使用 Google Scholar 進行引文，研究結果說明在沒有證據的情況下，不能認為 Google Scholar 的較高引用計數總是優於 WoS 和 Scopus，因為可能會包含較低品質的文獻進而可能會降低學術影響的程度。除此之外，Wang & Waltman (2016)比較了 WoS 以及 Scopus 兩種資料庫發現 WoS 比

Scopus 準確。但是必須要注意的是 Mongeon & Paul-Hus (2016)在 WoS 和 Scopus 的期刊覆蓋率比較分析中，認為當使用文獻計量方法進行研究評估時，重要的是了解每種資料庫其局限性，其研究比較了 WoS 和 Scopus 涵蓋的期刊，結果發現 WoS 的社會科學和藝術與人文學科領域的期刊覆蓋率相當低，與 Ulrichsweb 的相比，這些學科的代表性不足；Scopus 涵蓋的期刊數量較多，但兩個資料庫的覆蓋範圍在國家和語言之間並不平均，皆有英語文獻比例過高的情形，所以在進行分析時可能會帶來偏差。因此，Mongeon & Paul-Hus (2016)建議使用這些工具進行文獻計量分析時應該考慮資料庫差異的不同特徵。

綜上所述，Web of Science (WoS) 與 Scopus 皆為當前學術界進行文獻計量分析時最常使用的資料庫。雖然兩者在收錄範圍、引用次數與文獻品質控制方面各有優缺，且皆存在不同的語言與偏誤但在綜合考量資料完整性與精準度後，本研究選擇以 WoS 資料庫作為主要資料來源。確保資料具備一定的品質，並有助於後續文獻分析的準確，為進一步建構電動車電池回收領域的知識地圖與主題脈絡，下一節將說明本研究如何設定檢索關鍵字與策略，以系統性、全面性地蒐集相關文獻確保分析基礎的廣度與準確性。

第三節 設定檢索關鍵字及策略

上節的討論說明 WoS 資料庫適合用於探討研究車用電池回收的文獻計量研究，接著根據布林運算中聯集以及交集的概念設定車用電池回收相關的研究關鍵字進行檢索。根據以下列出之檢索策略所得到的關鍵字整理於附錄，透過 WoS 下載建立資料集 Ω 並且運用 CATAR 和 RGui 軟體分析分析資料集 Ω 。

為了讓研究能夠精準地了解車用電池回收的相關研究，以避免如偏題及非本研究範圍內之文獻納入資料集中，因此本研究定義車用電池回收相關研究的文獻篩選規則如以下：

- 一、 車用電池回收的核心主題為該領域的主要領域及主題，
- 二、 車用電池回收的相關技術與其他系統的整合(如:電池管理系統
(Battery Management System, BMS)，
- 三、 車用電池回收對環境、人權等影響。

附錄列出關鍵字檢索策略，並且經過檢所後共收集 139 筆文獻。

第四節 研究分析工具

本研究使用 CATAR 作為分析工具。CATAR 全名 Content Analysis Toolkit for Academic Research 是由曾元顯 (2011)教授所開發並且適用於包含中英文文獻，包含學術論文、新聞、訪談；專利文獻等，且該項技術及方法已投入相關研究並發表於各期刊(e.g., Tseng et al, 2007；Tseng et al., 2009；曾元顯、林瑜一, 2011)。曾元顯 (2011)在研究中指出該軟體之分析方法中，首先界定分析文件的範圍，如以某些關鍵字查詢結果作為待分析文獻，必要時可請專家一一確認關鍵字及文獻。本研究探討車用電池相關文獻，並透過檢索策略獲得車用電池回收之關鍵字，進而將關鍵字輸入 WoS 並下載建立資料集進行分析。

壹、概觀分析

為了探討各期刊與主題之間的影响力以及車用電池回收相關研究的分布。本研究透過 CATAR 軟體執行該資料集 Ω 之概觀分析，曾元顯, (2011)的技術發展研究中指出在查詢 CATAR 資料庫時，WoS 已經提供各種概要分析，如發表篇數、機構篇數、國家篇數等等，但就 CATAR 所能提供的概觀分析還有其他功能如從待分析文件的參考文獻裡，統計出最具影響力（依照被引用次數排序）的著作、期刊與作者；論文發表單位統計到系所等等將結果匯出至 Excel，以便研究人員能夠看出各單位機構的學術生產力並以做為參考。

貳、主題聚類分析(Clustering analysis)

為了了解待分析文獻中知識結構，CATAR 可自動辨識與擷取進行共現字(Co-word)及書目對(Bibliographic Coupling)分析。CATAR 會在前述兩項分析中，計算文件及文件之間的關聯性。曾元顯、林瑜一 (2011)指出 CATAR 中書目耦合 (Bibliographic Coupling) 是指當兩篇文章同時引用了相同的已發表文獻時，這兩篇文章之間便建立了一種耦合關係。引用的共同文獻數量越多，表示這兩篇文章的書目耦合強度越高，並顯示其研究主題的相似性和關聯性越強。共現字分析 (Co-word Analysis) 則是透過分析文件中的關鍵詞出現情況來衡量文章之間的關聯性。當兩篇文件的標題或摘要中包含相同的關鍵詞時，便產生了共詞關係。若出現的相同關鍵詞越多，則表明這兩篇文件在研究主題上的相似程度越高。

參、層次凝聚歸類法 (Hierarchical Agglomerative Clustering)

本研究中透過曾元顯 (2011)開發之軟體技術所進行的書目對分析及共現字分析針對文獻皆會建構相似度矩陣並依照矩陣用以文件歸類技術 (Salton, 1989 ; Jajuga et al., 2002)中的「層次凝聚歸類法」 (Hierarchical Agglomerative Clustering, HAC) ，將相似的文件歸類在同一個類別；除此之外，當資料集的資料較多時 CATAR 可以執行「多階段的主題歸類(Multi-Stage Clustering, MSC)」進行第二階的歸類(邵軒磊 & 曾元顯, 2018)。

圖 2 為多階段的主題歸類的示意圖，Yeh et al., (2022)的研究中使用二

階段的主題歸類，圖中黃色圓圈代表是透過資料收集得來的文獻，綠色圓圈則是將文獻歸類而成的類別稱為概念，以此類推。每階段都採用上述提到的 HAC 演算法進行歸類，可以特別注意示意圖中有空心圓圈代表該文獻系統認為與其他文獻相似度過低，進而無法歸類則被視為離群值。

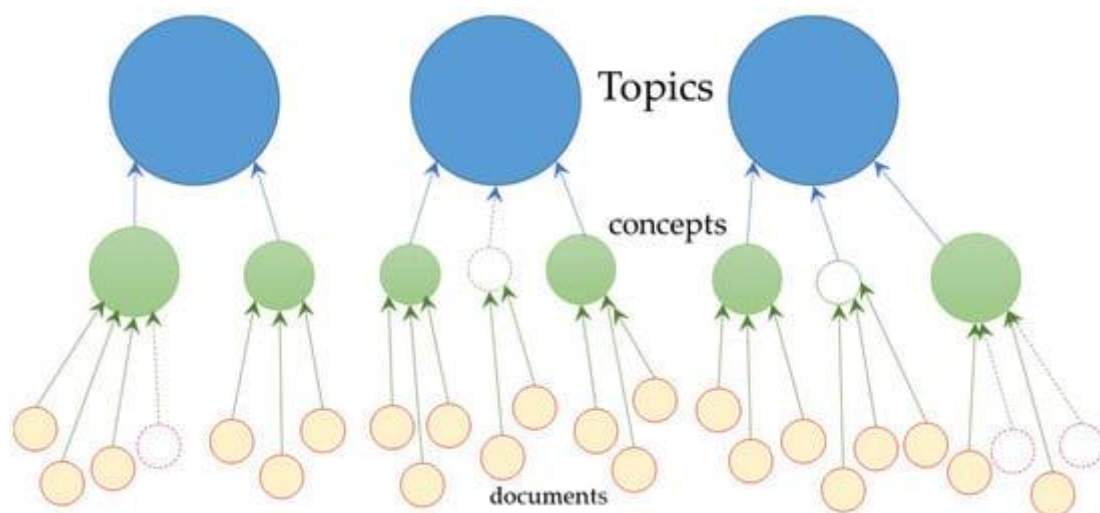


圖 2 為多階段主題歸類的示意圖(資料來源: Yeh et al., 2022)

肆、文獻關聯之計算

如圖 3 所示，共被引關係是指當兩篇文獻（例如論文 A 和 B）被同一篇文獻（如論文 1）引用時，這兩篇文獻之間即形成共被引的聯繫。若有更多的文獻同時引用這兩篇文獻，則顯示它們的關聯程度（通常反映主題的相似性）更高。例如，圖中顯示論文 A 和 B 的共被引強度為 1，而論文 C 和 D 的共被引強度為 2。

書目耦合則是指兩篇文獻（例如論文 C 和 D）若引用了相同的參考文獻（如參考文獻 2），則這兩篇文獻之間即形成了耦合關係。相同的參考文獻數量越多，表明這兩篇文獻的主題相似度越高，關聯性也越明顯。最

後共現詞則是指當兩篇文獻的內容（例如標題或摘要）中出現了相同的關鍵詞（例如詞彙 2 同時出現在論文 A 和 B 中），則這兩篇文獻便具有共現關係。若共現的詞數量越多，則顯示這兩篇文獻的主題相似程度也越高。

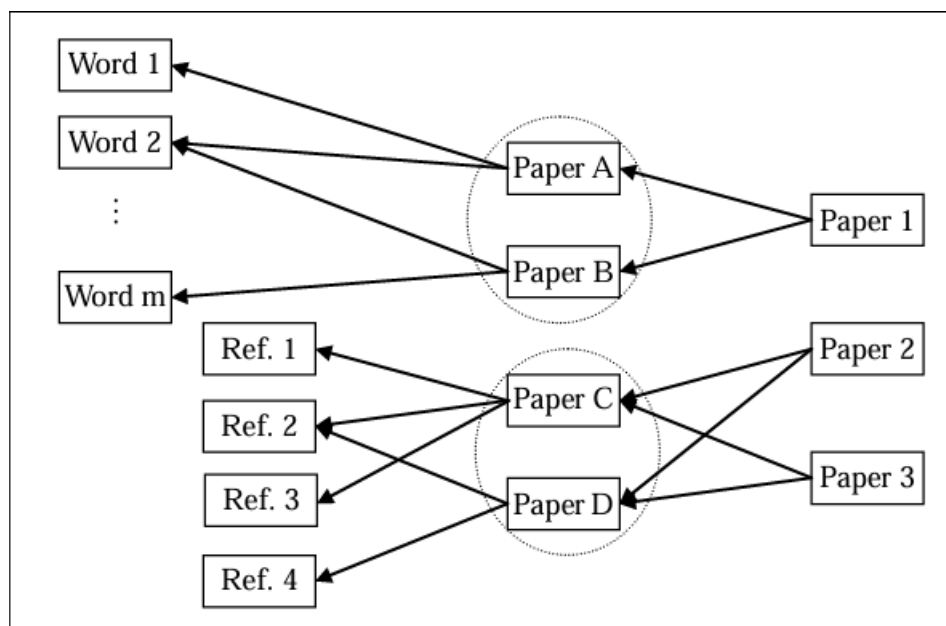


圖 3 為共被引、書目對、共現字關係的示意圖

（資料來源:曾元顯、林瑜一，2011）

據曾元顯、林瑜一 (2011)指出本研究使用的 CATAR 軟體分析工具使用 Dice 係數(Salton, 1989)將相似程度用介於 0~1 之間的分數值表示。其公式如下：

$$\text{Sim}(X, Y) = 2x|S(X) \cap S(Y)| / (|S(X)|+|S(Y)|)$$

以書目耦合為例，設 $S(X)$ 表示文件 X 的參考文獻集合， $S(Y)$ 表示文件 Y 的參考文獻集合， \cap 表示兩個集合的交集而 $|S(X)|$ 表示集合 $S(X)$ 中的元素數量； $|S(Y)|$ 表示集合 $S(Y)$ 中的元素數量。根據此公式，圖 3 中論文 C 與 D 的書目耦合相似度計算為 $2 \times 1 / (3+2) = 2/5 = 0.4$ 。進而針對 n 篇的文獻兩兩文獻的相似度建構出相似度矩陣，達到主題偵測的效果。

伍、類別結果的描述詞擷取

為了能夠理解類別的主題，本研究參考了(Tseng, 2010a)的方法。在分類的每個階段，會自動擷取各類別的特徵詞作為描述性詞彙，從而讓研究人員理解該類別之主題。該方法運用了(Tseng, 2002)提出的關鍵詞自動擷取技術，從文件的標題與摘要中挑選出關鍵的片語或詞彙，並依據篇數交叉分析表及公式計算出詞彙與類別的相關係數以表達這些詞彙與類別之間的關聯程度。其公式如下：

$$Co(T, C) = \frac{(TP \times TN - FN \times FP)}{\sqrt{(TP + FN)(FP + TN)(TP + FP)(FN + TN)}}$$

其中 TP、FP、FN、TN 分別代表詞彙 T 出現在類別 C 中的篇數 (TP)、詞彙 T 在其他類別中的篇數(FP)、 類別 C 裡不包含詞彙 T 的篇數 (FN)以及其他類別也沒出現詞彙 T 的篇數(TN)。

表 4 為詞彙 T 在類別 C 中的出現篇數交叉分析表。

		Term T	
Cluster C		Yes	No
	Yes	<i>TP</i>	<i>FN</i>
	No	<i>FP</i>	<i>TN</i>

根據曾元顯、林瑜一 (2011)對上述公式的解釋，當詞彙 T 僅出現在類別 C 的每一篇文件中，且未在其他類別中出現（即 $FP=FN=0$ ）時，則 C 與 T 之間的正相關達到最大，數值為+1；相反地，若詞彙 T 在類別 C 中未出現，但出現在其他類別中（即 $TP=TN=0$ ），則呈現最大負相關，數值為-1。因此，該係數可用來衡量詞彙 T 與類別 C 之間的關聯性。依此規則針對每個類別，均可計算出每個詞彙的相關係數（稱為該詞彙在該類別的代表性係數），並根據係數大小進行排序，最終選擇排名靠前的若干詞彙作為該類別的描述性詞彙（即該類別的代表詞）。

曾元顯、林瑜一 (2011)指出以上公式之相關係數對於短文本且數量較多的文獻可發揮優勢但沒有考量到出現在文本的次數，所以反之可能會導致類別描述詞不夠廣泛，所以技術開發者將出現篇數過低的詞彙排出，再進行乘積法作為新的類別代表性係數。

本研究透過 CATAR 分析工具進行文獻的系統性主題聚類分析並透過

Rgui 進行概觀分析。CATAR 能透過共現詞、書目耦合方法，同時輔以 Dice 相似度與描述詞相關係數的計算，不僅能揭露文獻間的知識結構與主題脈絡，也能針對每一主題類別提取具代表性的關鍵詞，提升後續分析的準確性與詮釋深度。透過多階段主題歸類法與精準的類別代表詞擷取，為研究者提供完整的知識地圖與議題輪廓。接下來的章節將根據前述分析架構，呈現車用電池回收領域文獻之研究分布、主題聚類結果與核心議題，進一步探討該領域的研究趨勢與發展方向。

第四章 研究結果

本研究根據第三章之研究方法及檢索策略共收集 139 篇文獻，建立時間跨度從西元 1995 年到 2025 年總計 30 年資料集 Ω ，並將資料集 Ω 分別執行 Rgui 與 CATAR 分析得出以下分析結果。

第一節 概觀分析

壹、車用電池回收研究的年度研究數量

Rgui 的統計結果可看出圖 4 車用電池回收領域內的研究從 2017 年開始到 2024 年開始逐漸爬升達到自 1995 年來的最高峰，與電動車的銷量呈現相同的成長趨勢，隨著電動車的用戶增加，同時也吸引了學術界的紛紛投入研究有關於電動車電池回收的相關議題。

除此之外，根據本研究第二章的討論可以看出車用電池面臨鋰、鈷、鎳等關鍵金屬的稀缺，而為了降低對新礦開採的依賴確保資源供應穩定，電池回收的研究成為重要趨勢且學界也發展出其他較為高效率的回收方法。

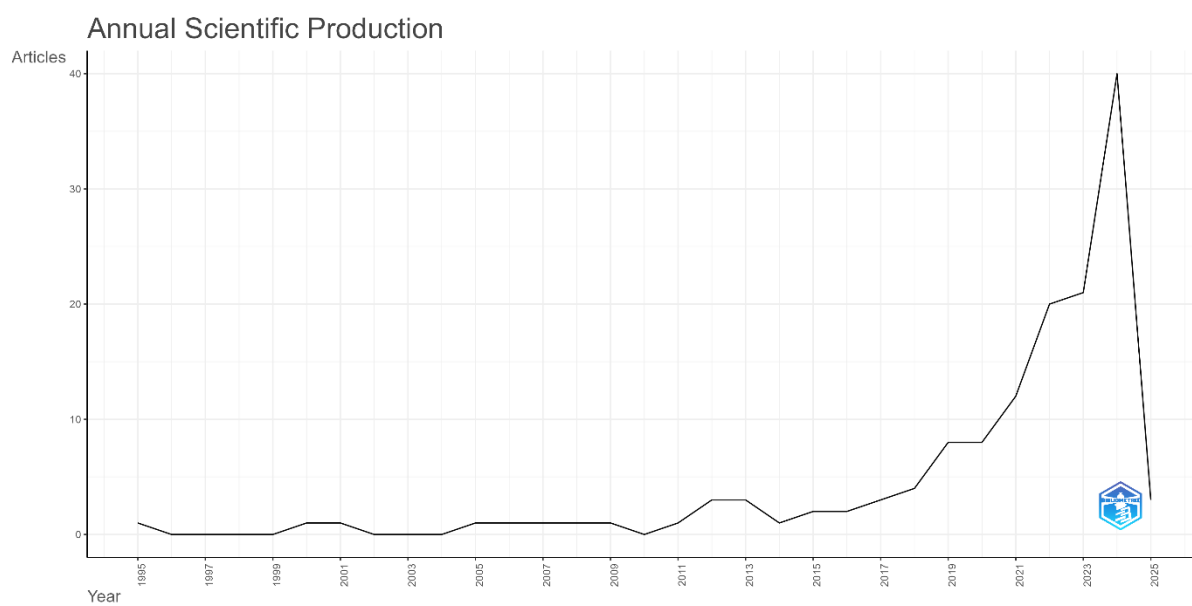


圖 4 為車用電池回收研究的年度研究數量。

貳、三域圖

從前段部分可以發現車用電池回收領域內的相關研究正在不斷的發表，而圖 5 為透過 Rgui 分析的三域圖，左邊欄位中「AU_CO」為論文作者所屬的國家，中間欄位「DE」是作者所下的論文研究關鍵字，右側欄位「SO」則為論文所發表的期刊。根據圖 5 的結果顯示車用電池回收領域內可以大致分為兩個主要的研究方向分別為鋰離子電池回收以及鈷回收。鈷回收的研究大多來自中國，其餘部分則來自日本與韓國，說明中國在車用電池回收領域內對於鈷回收相較於其他國家投入較多研究且研究分布於各期刊的數量較為平均。

此外，圖 5 說明在鋰離子電池回收方面，美國相對於其他國家投入較多研究。另外可以發現中國對於車用電池回收領域內有關於鋰離子電池回收的研究比起其餘六國來說僅略高於日本並與美國有著一定的差距，而論文發表情況較為平均且發表較多論文的期刊分別是《*Separation and Purification Technology*》、《*Journal of Power Sources*》、《*Metals*》、

《*ACS Sustainable Chemistry & Engineering*》以及《*Hydrometallurgy*》。

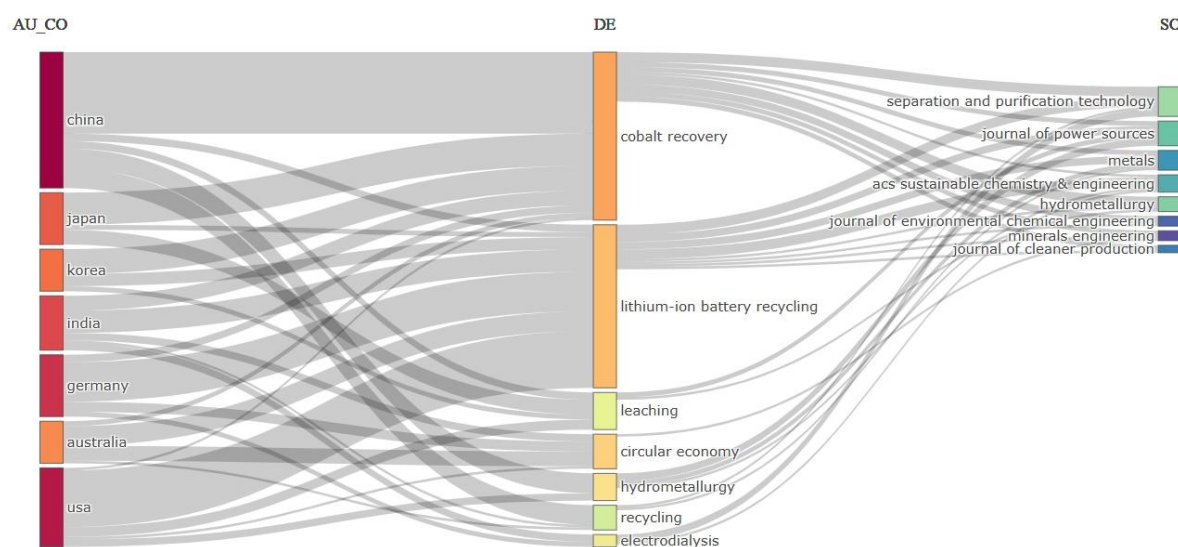


圖 5 為車用電池回收研究的三域圖。

參、車用電池回收研究發表統計圖-期刊

圖 6 為 Rgui 分析的結果顯示出整體研究分布的情形較為平均，且車用電池回收的研究主要集中在幾個期刊，車用電池回收研究內發表最多且與車用電池回收領域最相關的期刊是《*Separation and Purification Technology*》共發表了 8 篇顯示出學者們特別針對如何透過分離與純化技術回收電池材料及鋰、鈷、鎳等重要金屬投入較多研究。此外，《*Hydrometallurgy*》和《*Journal of Power Sources*》各有 7 篇文章，《*Hydrometallurgy*》提供有關於濕式冶金的相關技術，並探討如何透過浸漬、沉積等方法回收電池，也強調優化回收的製程、環境影響等；《*Journal of Power Sources*》則是針對電源技術和應用各個方面，其中包含車用電池裡的核心電池技術及類別如一次電池(原電池)、二次電池(蓄電池)、燃料電池等相關技術及研究，同時也說明在車用電池回收領域內的研究在所有的回收方法中針對於濕式冶金投入較多研究，也從技術的角度探討材料的再利用及電池的設計等。

特別值得注意的是發表的期刊還包括《*ACS Sustainable Chemistry & Engineering*》與《*Metals*》各發表了 6 篇車用電池回收的相關研究，說明除了技術本身的開發外，永續性與環境友善也成為車用電池回收的研究焦點，學者們試圖透過綠色化學且低耗能的回收技術來減少環境負擔，使電池回收更加的環境友善。《*Metals*》則是發表了金屬方面如化合物、金屬應用等

等有關的相關研究，在車用電池回收領域內探討如何電池中的貴金屬，如鋰、鈷和鎳等。

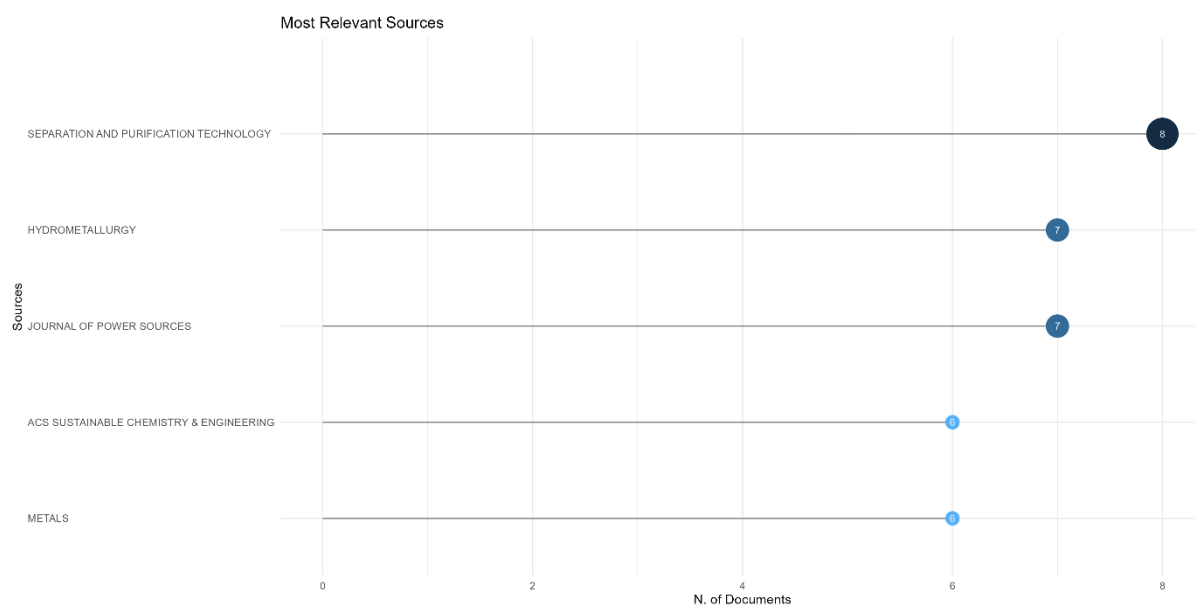


圖 6 為車用電池回收研究發表統計圖-期刊

肆、車用電池回收研究發表統計時間序列圖-期刊

根據 Rgui 的統計結果顯示該領域研究發展初期，大多研究都發表於《*Journal of Power Sources*》針對於電化學技術及應用進行研究，濕式冶金回收的研究也在這之後逐年增加；然而可以觀察到近年來發表趨勢中《*ACS Sustainable Chemistry & Engineering*》與《*Separation and Purification Technology*》等期刊的發表數量有明顯成長，說明研究也開始探討永續化學、資源回收以及純化技術相關領域。

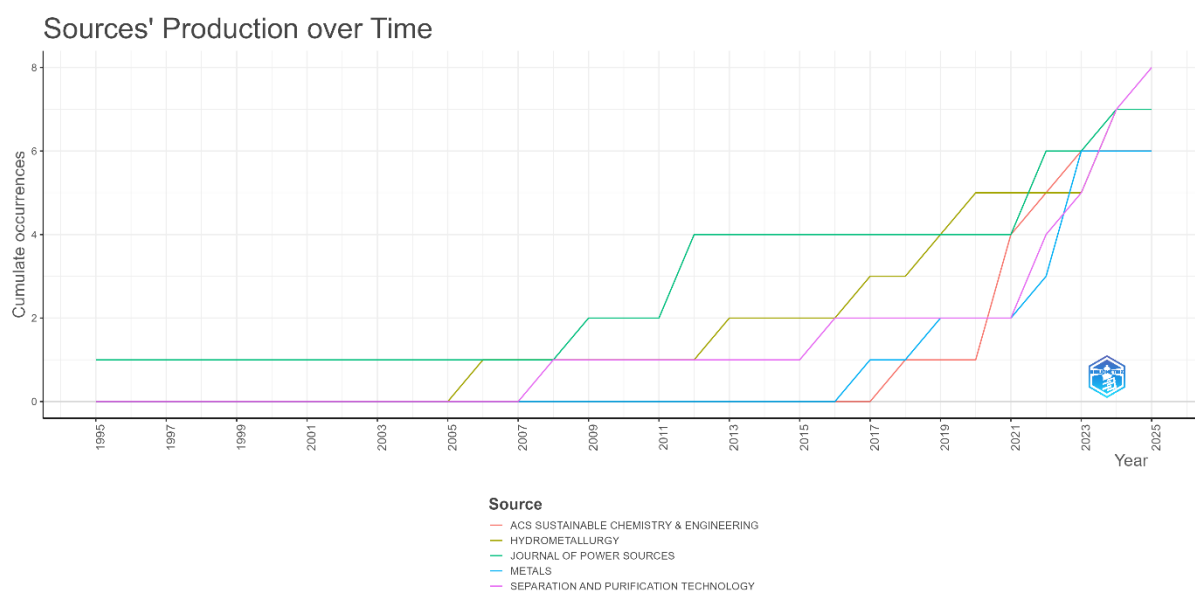


圖 7 為車用電池回收研究發表統計時間序列圖-期刊

伍、車用電池回收研究發表統計圖-作者

圖 8 為 Rgui 統計出與車用電池回收相關研究領域最為相關的作者及其對於該領域內的研究發表數量。統計結果說明目前由於該研究領域相較於其他領域較新，大部分的學者發表數量較為平均但從統計結果可以看出 Friedrich, Bernd 該領域的研究貢獻，發表數量成為該領域內最具影響力的學者之一，其他學者如 Bhattacharyya, Sohini、Dong, Peng、Duan, Jianguo 等人的論文數量顯示該領域的研究熱度逐步上升且吸引學者們紛紛投入研究。隨著他們對於該領域的進一步投入研究與發展，預計將推動車用電池回收技術與知識。

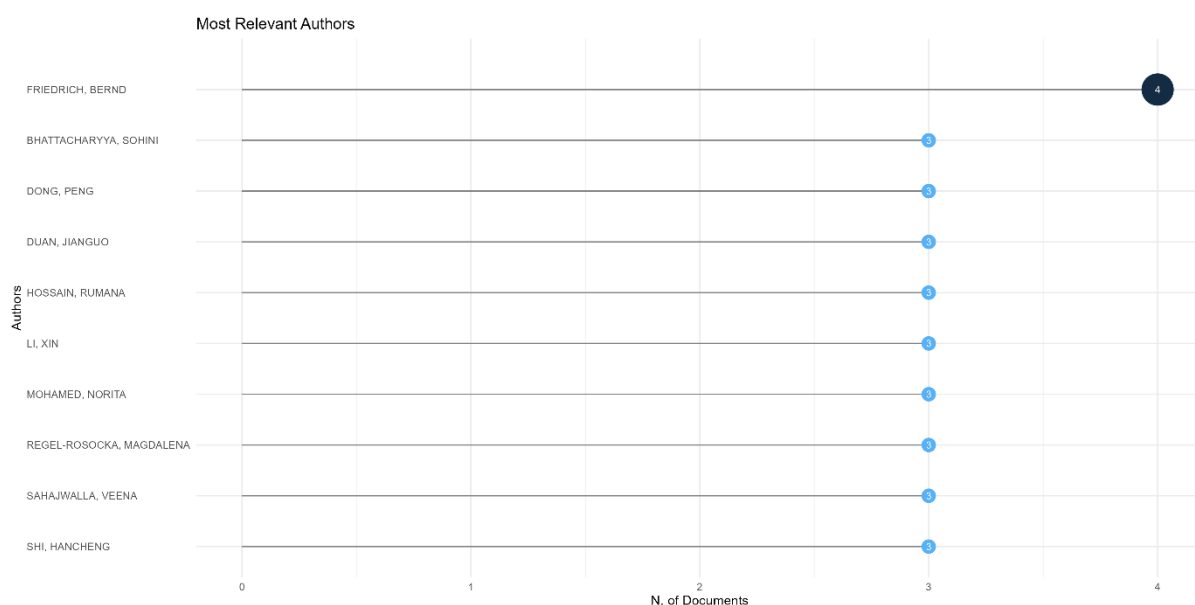


圖 8 為車用電池回收研究發表統計圖-作者

陸、通訊作者所屬國家與跨國合作研究情形統計

圖 9 統計了與車用電池回收相關研究中通訊作者所屬的國家，以及其發表論文的合作類型。圖中使用兩種顏色區分論文類型：

SCP(Single Country Publications)為單一國家學者發表論文出版論文：僅由一個國家的作者合作發表（藍色）。

MCP(Multiple Country Publications)為跨國學者合作發表出版論文：來自多個國家的作者共同發表（紅色）。

中國在該領域的研究產出最多，共發表 39 篇論文，其中 SCP 為 29 篇，MCP 為 10 篇。SCP 占總發表數的 74.4%，MCP 占 25.6%。結果顯示中國的研究主要由國內作者主導跨國合作比例相對較低，可能與其具備完整的本土產業鏈與強大的研究資源有關，使得學術活動多集中於國內合作。美國排名第二，共發表 12 篇論文，其中 SCP 為 9 篇，MCP 為 3 篇，SCP 占 75%，MCP 占 25%。美國的 MCP 比例與中國相近，但總體發表數量較少，反映其在該領域的國際合作仍具一定程度。德國共發表 10 篇論文，其中 SCP 為 8 篇，MCP 為 2 篇，SCP 占 80%，MCP 占 20%。雖然德國擁有全球知名車廠與強大的工業基礎，但在該領域的研究合作類型仍以本國機構為主。印度共發表 9 篇論文，全部為 SCP 占 100%。顯示印度在車用電池回收領域的研究目前幾乎完全由國內機構主導，尚未形成明顯的國際合作網絡，未來各國若能加強與他國的學術合作，將有助於技術與知

識的進一步交流與提升。

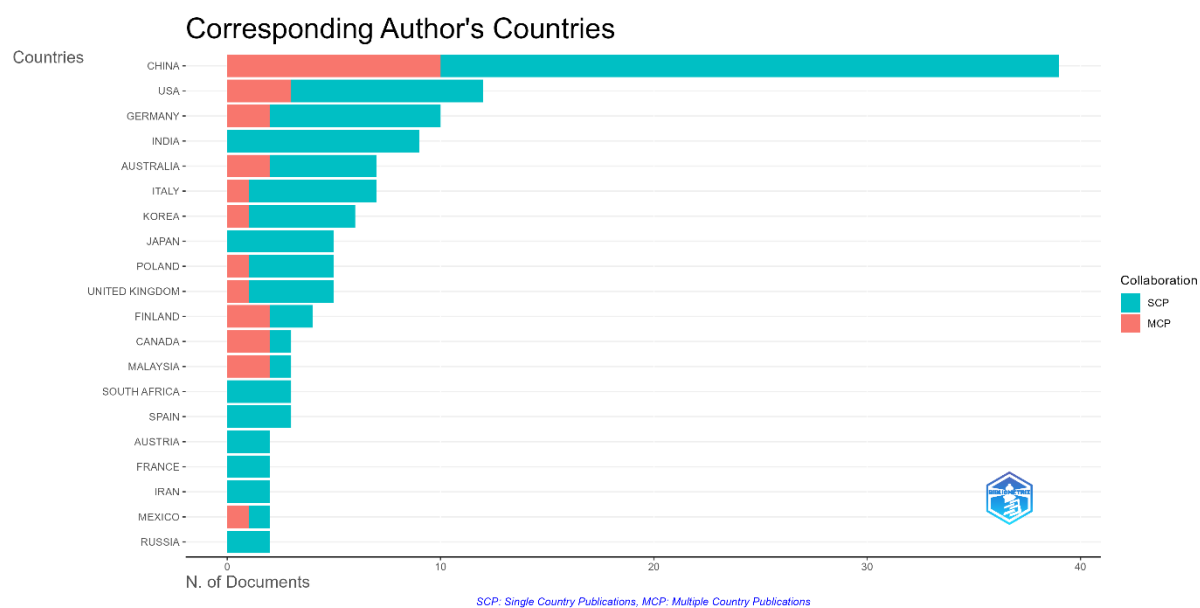


圖 9 為通訊作者所屬國家與跨國研究合作情形統計

柒、車用電池回收領域的論文發表時間序列圖-國家

圖 10 為各國對車用電池回收領域的論文發表數量的時間序列圖並以國家進行統計，自 2015 年起車用電池回收研究的論文發表數量開始成長，並在 2020 年後出現明顯的趨勢，說明該領域受到越來越多學者的關注。2015 年以前中國研究發表數量較少，但自 2018 年開始快速成長，特別到了 2020 年後論文數量遠超其他國家，除了因為中國政府推動新能源政策、電動車產業發展，更重要的是車用電池回收的法規推動，例如 2018 年中國推出《新能源汽车动力蓄电池回收利用溯源管理暂行规定》制定了生產品責任延伸制，要求電動車企業對電池進行全生命週期管理 (Ministry of Industry and Information Technology, 2018)；或是 2021 年實施的《新能源汽车动力电池综合利用管理办法》用以要求電池回收可追溯並納入國家平台進行監管，同時推動更多學術研究及梯次利用。

除此之外，政策法規的推動，使得中國電池企業、汽車製造商與學術機構加速投入電池回收技術研發，形成了產學研合作的環境；從車用電池回收研究的作者所屬機構統計圖如:圖 11 可以發現許多論文作者皆來自中國科學院(Chinese Academy Science)，顯示中國對於車用電池回收研究的重視以至於中國在該領域內取得學術上的領導地位。

另外，美國在 2000 到 2015 年間的研究發表與各國相差不遠，且 2018 年開始成長但與中國相比成長幅度較小。Gaines et al., (2021)指出美

國預計電動車未來快速成長，將會有許多鋰電池被淘汰，因此美國能源部為此投入資金並在 2019 年成立了 ReCell 研究中心，致力於開發鋰電池的回收技術，其他還有各種政策展現出美國政府對於車用電池回收領域的重視；然而，自美國能源部對於車用電池回收領域投入資金成立研究中心，可以看到圖 10 美國的論文發表數量也穩定成長，如圖 11 所示美國能源部為車用電池研究中世界第二多作者的所屬機構。

總結來說車用電池回收研究的全球統計圖（圖 12）深色區域為論文發表數量較多的國家，越深則代表發表的數量越多。可以看出車用電池回收的研究主要集中於中國及美國而且主要以國家本身的資源投入其中，但其他國家從各統計圖表可以發現如印度及德國也開始紛紛投入該領域內進行研究，說明了對於車用電池研究正在成為趨勢且是各國十分重視的科學領域。

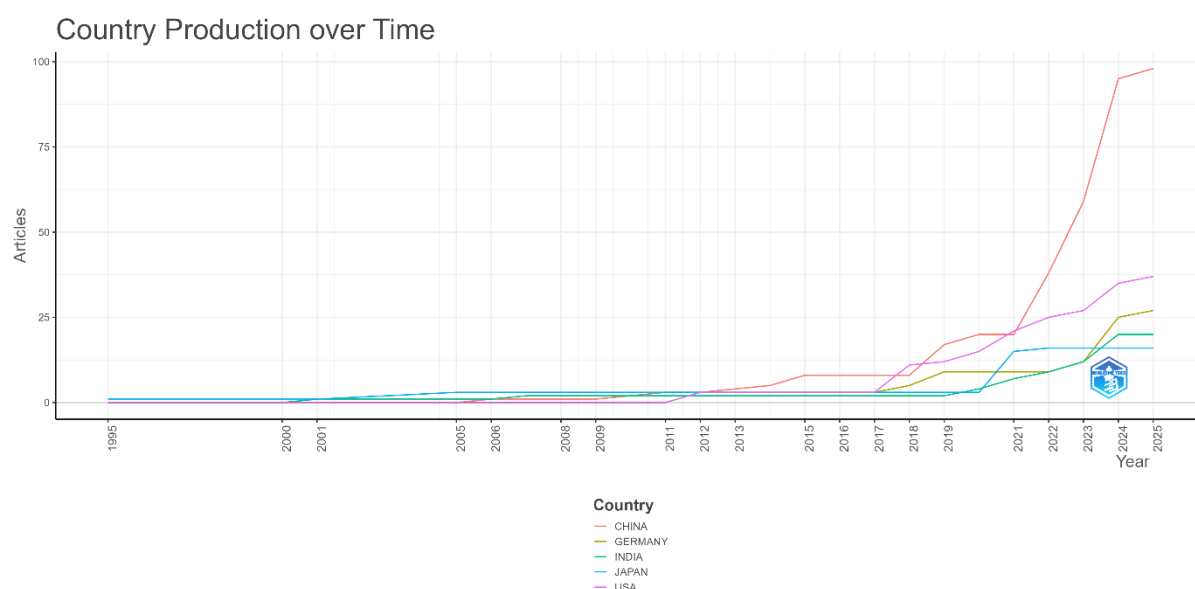


圖 10 為車用電池回收領域的論文發表時間序列圖-國家

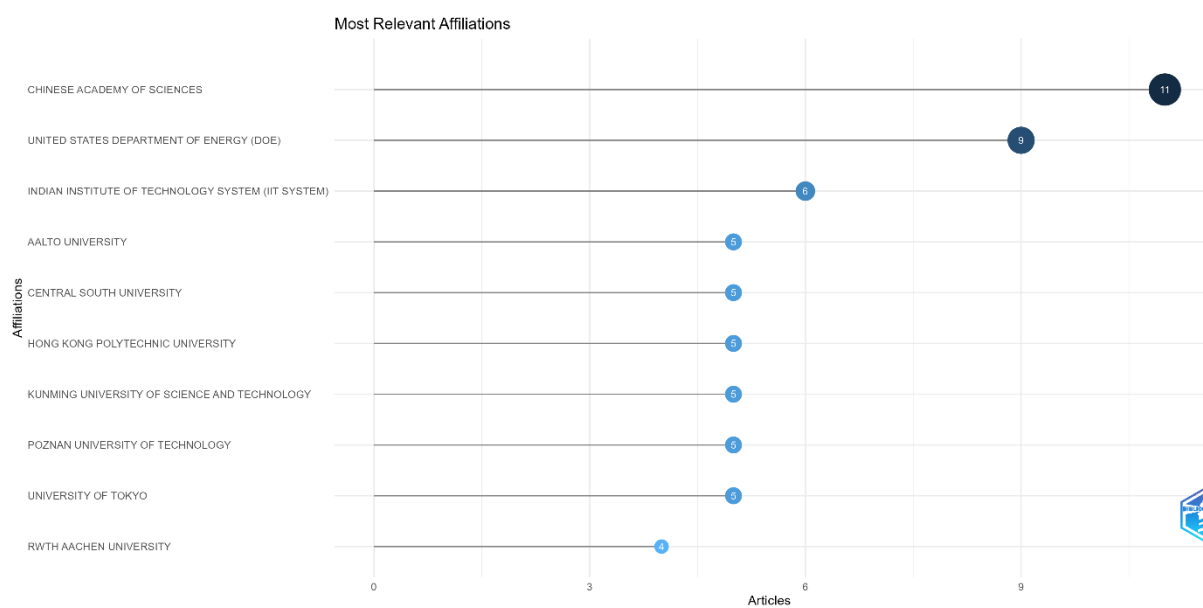


圖 11 為車用電池回收研究的作者所屬機構統計圖

Country Scientific Production

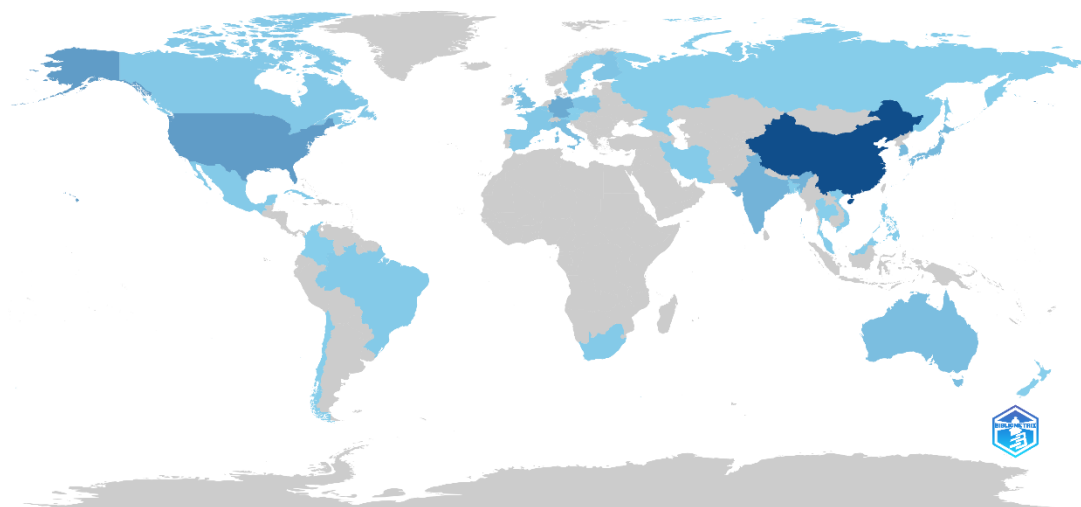


圖 12 為車用電池回收研究的全球統計圖

捌、最具影響力的論文

圖 13 為車用電池回收研究的被引用次數統計圖可以看出在該領域內最具影響力的文獻屬《Georgi-Maschler T., 2012, *J Power Sources*》是目前被引用次數最高的論文，其次則是《Ferreira DA., 2009, *J Power Sources*》以 331 次被引用排名第二。此外《*Journal Power Sources*》出現多篇高被引論文，說明該期刊在動力電池及其回收技術研究方面的影響力，但值得注意的是《*Separation and Purification Technology*》為車用電池回收領域內收錄較多的文獻，但就被引用次數的影響力來說《*Journal Power Sources*》的影響力高於《*Separation and Purification Technology*》。

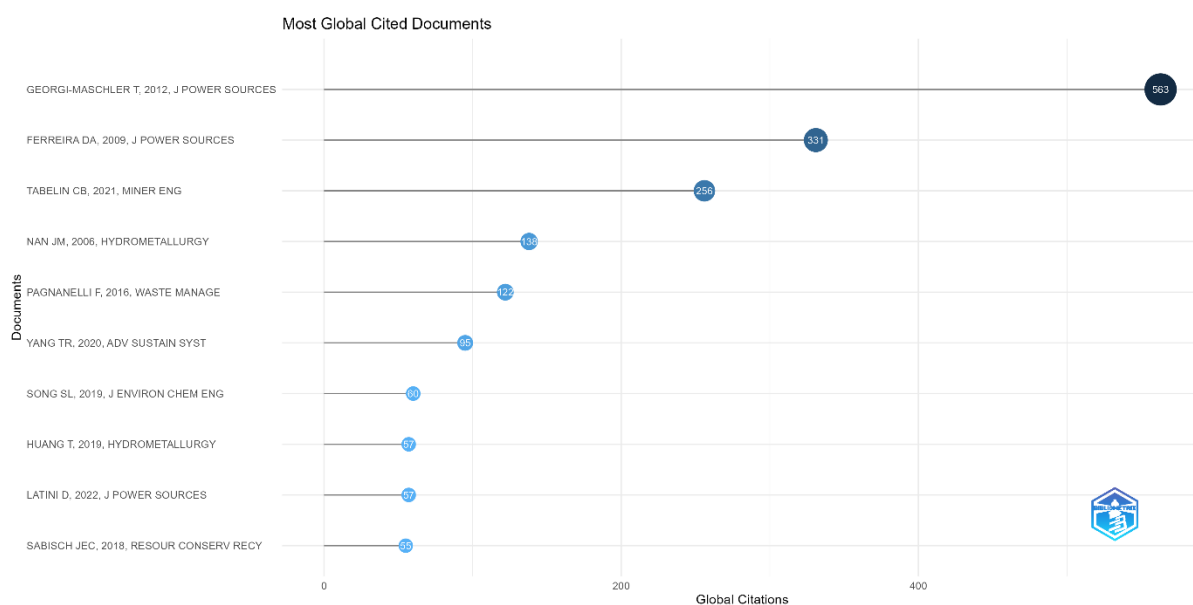


圖 13 車用電池回收論文的被引用次數統計圖

玖、文字雲分析與主題趨勢

文字雲將資料視覺化並針對字詞的頻率，將字詞透過字體的大小、顏色並以詞頻作為區分大小粗細的關鍵如劉宜君（2016）及張淑惠等人(2021)並且根據 WoS 從被引用文獻的標題產生的索引字詞產生的「Keyword Plus」。

從圖 14 為車用電池回收研究的文字雲分析統計圖可以看出在該領域內「recovery」（回復、回收）一詞被提及次數非常高，其次則是「separation」（分離、拆解）說明該領域內主要探討車用電池的回收及拆解，其中包含車用電池最常使用的「lithium-ion batteries」（鋰離子電池）並且該領域的論文聚焦於電池內如「cobalt」（鈷）、「nickel」（鎳）及「li」（鋰）的「valuable metals」（價值金屬）有價貴金屬回收及「extraction」（萃取、抽取）。除此之外，圖 14 說明車用電池回收研究領域內說明該領域內回收方法多半聚焦於透過「solvent extraction」（溶劑萃取）或者透過「hydrometallurgical process」（濕式冶金）進行回收。

然而從圖 15 的研究主題趨勢可以看出研究初期主題較為零散且相同字詞出現的頻率較低，研究重點主要圍繞在「oxide」（氧化物）、「hydrometallurgical process」（濕式冶金）和「metal values」（有價金屬）基礎材料科學及回收技術也為後續技術發展提供了一些方向，但電動車市場蓬勃發展，因此學術界對車用電池回收的相關議題關注度有限。然而，隨著電動車市場的快速成長以及鋰離子電池的普及，研究主題逐漸轉向「lithium-

ion batteries」(鋰離子電池)並開始出現「removal」(去除)、「solvent-extraction」(溶劑萃取)、「separation」(分離)、「nickel」(鎳)等字詞，說明學術界開始關注如何有效的回收電池中關鍵金屬以至於減少對礦物資源的依賴。近年全球對於車用電池回收研究的關注進入高速發展的階段如「recovery」(回收)、「cobalt」(鈷)、「electrode materials」(電極材料)、「acid」(酸性)及「model」(電路模型)等詞彙的出現頻率增加顯示車用電池回收的相關研究已從回收技術進而開始轉向提升材料分離效率與金屬提取的創新技術。

總結來說從年度研究數量的上升趨勢可見，該領域逐漸受到學術界高度關注，研究主題圍繞在鋰、鈷、鎳等關鍵金屬的回收技術。在三域圖的視覺化分析中，可見中國與美國為主導研究的國家，分別在鈷與鋰離子電池回收上具備較豐富的研究能量，並於多個國際期刊上發表相關論文，顯示全球對此議題的重視。此外，從期刊分布與時間序列圖來看，

《*Separation and Purification Technology*》與《*Journal of Power Sources*》等期刊為此領域的主要知識平台，其發表趨勢亦反映研究重點從初期的電化學與冶金回收，逐漸拓展至永續化學與資源純化等議題。而作者及研究機構的分析進一步顯示中國科學院與美國能源部等機構在學術發表上的主導地位，並透過國內或跨國合作推動知識產出與技術研發。在國家個別分析中，中國與美國持續主導此領域的學術與產業發展特別是中國在法規政策的推動下，不僅促進企業與學界合作也大幅提升研究產出，說明政策對

學術趨勢的高度影響力，印度與德國等國則逐步投入。進一步的被引用次數統計與文字雲分析亦呼應前述發現，顯示「recovery」、

「separation」、「lithium-ion batteries」等詞彙頻繁出現，說明研究主軸仍以材料回收與技術優化為主。而研究主題的演變也從早期的基礎冶金技術逐步轉向更為精細的萃取流程與模型應用，呈現技術深化與應用廣化的雙軌發展。基於以上分析為更深入探索此領域的知識結構與研究重點的轉移，本研究將進一步進行書目對分析與共現字分析，挖掘核心研究主題間的連結與變遷趨勢，掌握車用電池回收領域的學術演進脈絡並找出潛在的研究機會與技術創新方向。

第二節 書目對分析及共現字分析

書目對分析為透過不同文獻引用狀況，藉以衡量兩篇文獻之間的相似性，亦將此關係稱為耦合關係；然而，耦合關係的強度則根據兩篇論文之間共同的參考文獻數量而決定，所以當共同的參考文獻數量越多，兩者的主題越相近。透過 CATAR 執行書目對分析的二階結果如圖 16，分析結果說明車用電池回收領域的研究可以分為 8 個主題樹，以圖 16 第一個主題為例「163 : 21 Docs. : 0.021563 (waste:2.7748, lithium-ion:2.5940, solution:2.4279, recycl:0.6854, spent:0.5398)」，其中 163 為 CATAR 之系統編號，21 則表示該主題內包含 21 篇文獻；另外，0.021563 則表示該主題樹內的子主題之間(即圖 16 空心圓圈顯示部分)的相似程度不低於 0.021563，括號內的字詞則為系統主動擷取的主題描述詞，描述詞後的數字則為代表性係數，目的是讓系統及研究人員辨識該描述詞可以多大程度的代表該聚類之主題。

圖 17 則為 CATAR 執行共現字分析的二階結果。結果說明車用電池回收領域的研究可以分為 14 個主題樹，共現字分析是為了建構專業知識領域內的知識連結，藉由字詞出現的頻率進行統計與字詞與字詞之間的共現關係，呈現出領域知識的群集結構及演進趨勢。相關學者已將共現字分析投入於各個學域的研究，進而發掘該領域的熱門議題與發展焦點。解讀的方式與書目對並無不同但是其中的意義有些許差異；曾元顯、林瑜一 (2011) 指出從兩種分析結果來看，因為書目對是透過引用文獻進行聚類所以可以

發現歸類出的主題描述詞可能有明顯的差異，也因此就算兩者之間的字詞較為罕見只要兩篇文獻共同參考的數量夠多也可以看出兩者具有相似的主題。但如果今天情況相反，假設兩者探討相同主題但是並沒有使用共同的參考文獻可能會導致沒有被聚類成同一主題的情形，這時候可以利用共現字分析的結果看出兩者同時使用相同字詞的程度聚類成同一主題。

綜上所述，所以本研究將兩個分析結果整理成表 3，以全面的了解車用電池回收領域內的研究主題。從不同的分析角度可以得出不一樣的分析結果，從表 3 可以看出車用電池回收研究領域內主題的共通性，就猶如表 3 中相同的字詞：「鋰離子」、「溶解」、「負極」、「回收」、「電池」、「材料」、「金屬有機」、「萃取」、「鈷」、「電池組」、「車輛」、「電動」，這種兩種分析所產生出的共同字詞，說明在車用電池回收研究的領域這些主題的有極高的可能存在，以至於能夠透過兩種分析產出相同的結果。

表 5 為兩種分析結果表(左為書目對結果、右為共現字分析結果)

主題聚類	書目對分析二階結果	共現字分析二階結果
Cluster 1	鋰離子、溶解、廢棄物	材料、鋰離子電池、消耗
Cluster 2	鋰離子、負極、電池、回收	析出、溶解、氧化物、回收
Cluster 3	車輛、電動、電動車電池、政府	析出、萃取、溶劑、鈷
Cluster 4	電透析、鋰離子、回收、電池	鈷、鈷回收率、電池組
Cluster 5	萃取、管住層析法、技術、鈷	負極、負極材料、回收、箔
Cluster 6	生活汙水、氨、材料、蒸餾	車輛、電動、電動車、回收
Cluster 7	金屬有機物、聚醯亞胺、金屬有機框架、反溶劑	鈷、分離、吸附
Cluster 8	電池外殼、批次處理、發電的、氯離子	正極、可行性、鋰離子
Cluster 9	富鋰錳電池、中國、電動車、廢水	二次利用、鎳、生產、供應
Cluster 10		生物析出、酸、磷、檸檬酸
Cluster 11		萃取、粉末、金屬、金屬分離
Cluster 12		運作、浸漬液、去離子、電容去離子
Cluster 13		電源管理系統、補貼、鉛
Cluster 14		郡、廢鹼、鹼性

There are 9 clusters, 31 items

4 clusters contain 2 items
2 clusters contain 3 items
1 clusters contain 4 items
1 clusters contain 6 items
1 clusters contain 7 items

1(7):

- 163 : 21 Docs. : [0.021563](#) (**lithium-ion**:3.1145, **solution**:2.7073, **waste**:2.6757, **spent**:0.7869, **cobalt**:0.4781)
 - 89 : 13 Docs. : [0.037037](#) (**electrodialysi**:2.5556, **lithium**:1.5474, **evolution**:1.2778, **cobalt**:1.0808, **solution**:1.0641)
 - 49 : 10 Docs. : [0.052239](#) (**electrodialysi**:3.1497, **lithium**:2.3110, **evolution**:1.5749, **solution**:1.5283, **waste**:0.8142)
 - 3 : 6 Docs. : [0.120567](#) (**electrodialysi**:4.0937, **sulphate**:2.0857, **simulation**:2.0857, **lithium**:1.5451, **two-phase flow**:1.3904)
 - [0 : 1540 : 4 Docs. : 0.016393](#)(**solution**:2.1981, **electrodialysi**:2.0996, **lithium**:1.1489, **hydrometallurgical**:0.7633, ...)
 - [23 : 7 : 2 Docs. : 0.295775](#)(**electrodialysi**:4.1846, **sulphate**:4.0000, **simulation**:2.4975, **gas evolution**:2.1124, **two-phase** ...)
 - [36 : 691 : 4 Docs. : 0.032258](#)(**cobalt**:1.4125, **recovery**:1.1676, **battery**:0.8054, **metal value**:0.6999, **waste**:0.5108)
 - [6 : 368 : 3 Docs. : 0.047059](#)(**lithium-ion**:1.0279, **lithium-ion battery**:0.7242, **recovery**:0.6041, **lithium-ion battery recycl** ...)
 - 122 : 8 Docs. : [0.028777](#) (**implication**:1.6046, **battery**:1.3859, **waste**:1.3570, **lithium-ion**:1.3553, **application**:0.8995)
 - 24 : 5 Docs. : [0.065574](#) (**citrate**:1.3904, **type**:1.3904, **type li-ion battery**:1.3904, **high-purity**:1.3904, **manganese**:1.0745)
 - [11 : 46 : 2 Docs. : 0.111111](#)(**manganese**:2.2699, **citrate**:1.4746, **complex**:1.4083, **type li-ion battery**:1.4083, **high-purity** ...)
 - [5 : 1148 : 3 Docs. : 0.022222](#)(**battery**:1.0418, **waste**:0.8743, **recycl**:0.7484, **lithium-ion battery**:0.7242, **spent**:0.6024, ...)
 - [8 : 952 : 3 Docs. : 0.025641](#)(**environmental**:1.2469, **lithium-ion**:0.8994, **waste**:0.6996, **battery**:0.5556, **electrode**:0, ...)

2(6):

- 90 : 32 Docs. : [0.036731](#) (**lithium-ion**:9.4657, **cathode**:9.2234, **battery**:5.6569, **recycl**:4.0819, **spent**:2.6604)
 - 23 : 18 Docs. : [0.065628](#) (**lithium-ion battery**:5.7745, **aluminum**:2.4069, **high-voltage**:2.4069, **cathode**:1.9258, **recycl**:1.7225)
 - 1 : 14 Docs. : [0.136986](#) (**lithium-ion battery recycl**:3.4761, **aluminum**:3.0000, **material**:2.2834, **separation**:2.1442, **current**:2.0857)
 - [10 : 1845 : 10 Docs. : 0.011111](#)(**lithium-ion**:7.0160, **lithium-ion battery**:5.9091, **economy**:4.8651, **recycl**:2.8564, **challenge** ...)
 - [37 : 1702 : 4 Docs. : 0.014286](#)(**material**:2.4849, **aluminum**:1.6440, **lithium-ion**:1.1920, **battery**:1.1276, **pyrolysis**:1.0498, ...)
 - [34 : 1855 : 4 Docs. : 0.010638](#)(**industrial**:1.5337, **lithium-ion**:1.4900, **lithium-ion battery**:1.4207, **electrochemical** ...)
 - 11 : 14 Docs. : [0.084507](#) (**cathode**:4.2368, **deep**:3.7857, **eutectic**:3.7857, **solvent**:3.6747, **cobalt**:2.5355)
 - 2 : 10 Docs. : [0.120983](#) (**eutectic**:4.8138, **deep**:4.8138, **solvent**:4.7760, **cathode**:2.7811, **cathode recycl**:2.7809)
 - [2 : 474 : 4 Docs. : 0.040404](#)(**lithium-ion**:1.6390, **spent**:1.5569, **cobalt**:1.4125, **cathode**:1.0656, **battery**:0.9665)
 - [21 : 136 : 6 Docs. : 0.072727](#)(**deep**:11.1591, **eutectic**:11.1591, **solvent**:9.1047, **cathode**:4.1233, **deep eutectic solvent** ...)
 - [4 : 1247 : 4 Docs. : 0.020619](#)(**cobalt**:1.5694, **electrochemical**:1.3997, **metal**:1.1176, **recovery**:1.0508, **cathode**:0.8880, ...)

3(4):

- 277 : 10 Docs. : [0.010417](#) (**vehicle**:4.3430, **electric**:3.8604, **electric vehicle battery**:2.7292, **government**:2.0469, **recycl**:1.6879)
 - 238 : 8 Docs. : [0.013699](#) (**government**:2.4069, **vehicle**:2.0708, **electric**:1.7257, **instrument**:1.6046, **recycl**:1.2919)
 - 25 : 6 Docs. : [0.065359](#) (**government**:3.0000, **vehicle**:2.9176, **electric**:2.4313, **emission**:2.0857, **mechanism**:1.6046)
 - [19 : 83 : 2 Docs. : 0.087719](#)(**game**:3.1218, **reward-penalty**:2.1124, **deposit-refund**:2.1124, **government**:2.1033, **dual-channel** ...)
 - [33 : 1194 : 4 Docs. : 0.021505](#)(**vehicle**:5.6812, **electric**:4.4217, **blockchain**:3.5054, **emission**:2.2581, **recycl**:1.2398, ...)
 - [28 : 454 : 2 Docs. : 0.041237](#)(**lead-acid battery**:6.0000, **lead-acid**:6.0000, **pyrite cinder**:2.1124, **lead-acid battery recycl** ...)
 - [25 : 1037 : 2 Docs. : 0.023810](#)(**echelon utilization**:2.1124, **electric**:1.7222, **vehicle**:1.6596, **supply chain**:1.4083, **driv** ...)

4(3):

- 143 : 6 Docs. : [0.024691](#) (**electrodialysi**:1.5749, **lithium-ion**:1.1294, **recovery**:1.1127, **battery**:0.8819, **spent**:0.1084)
 - 79 : 4 Docs. : [0.039216](#) (**carbon-negative**:2.0857, **formic acid**:2.0857, **electrodialysi**:2.0469, **crystallization**:1.3966, **zero-liquid**:1.3904)
 - [13 : 292 : 2 Docs. : 0.052632](#)(**carbon-negative**:2.1124, **anode**:1.4746, **recovery through a carbon-negative electrodialysi** ...)
 - [22 : 333 : 2 Docs. : 0.049383](#)(**formic acid**:2.1124, **zero-liquid discharge**:2.1124, **crystallization**:1.4746, **cobalt and nickel** ...)
 - [27 : 403 : 2 Docs. : 0.044444](#)(**group decision**:2.1124, **mak**:1.4746, **fuzzy**:1.4083, **multi-criteria**:1.4083, **reviv spent lithium** ...)

5(3):

- 234 : 10 Docs. : [0.013937](#) (**extraction**:1.9599, **column**:1.6046, **technology**:1.0499, **cobalt**:0.8874, **metal**:0.8142)
 - 35 : 8 Docs. : [0.059880](#) (**plant**:2.7809, **extraction**:2.6803, **cobalt**:2.2885, **column**:2.0000, **zinc**:1.8621)
 - [35 : 1078 : 4 Docs. : 0.023346](#)(**plant**:3.3898, **zinc**:2.8966, **zinc plant residue**:2.8044, **secondary**:2.1296, **comprehensive** ...)
 - [38 : 793 : 4 Docs. : 0.028986](#)(**industrial**:2.9821, **catalyst**:2.9815, **extraction**:2.6045, **cobalt**:2.3541, **cyanex**:1.6440, ...)
 - [14 : 267 : 2 Docs. : 0.055556](#)(**rare**:6.0000, **bioleach**:6.0000, **earth**:6.0000, **element**:4.0651, **magnet**:2.8165)

6(2):

- 70 : 7 Docs. : [0.042403](#) (**lifepo**:2.7809, **ammonia**:2.7809, **material**:2.2834, **distillation**:2.0857, **limn**:1.3904)
 - [3 : 1120 : 4 Docs. : 0.022727](#)(**ammonia**:5.6087, **lifepo**:4.2065, **distillation**:4.2065, **spent**:1.5569, **storage**:1.4483)
 - [9 : 1529 : 3 Docs. : 0.016529](#)(**material**:1.0714, **recycl**:0.7484, **lithium-ion battery recycl**:0.6923, **hydrometallurgy**:0, ...)

7(2):

- 58 : 4 Docs. : [0.048193](#) (**metal-organic**:2.0857, **amic-acid**:1.3904, **metal-organic framework**:1.3904, **antisolvent crystallization**:1.3904, **contaminant**:1.3904)
 - [17 : 118 : 2 Docs. : 0.077922](#)(**contaminant**:2.1124, **antisolvent crystallization**:2.1124, **electrochemical**:1.7272, **direct** ...)
 - [18 : 430 : 2 Docs. : 0.042553](#)(**metal-organic framework**:1.4746, **metal-organic**:1.4746, **amic-acid**:1.4083, **molecular**:1, ...)

8(2):

- 27 : 7 Docs. : [0.063830](#) (**cell**:2.4069, **batch**:2.0857, **electrogenerative**:2.0857, **chloride**:2.0857, **flow**:1.6046)
 - [1 : 325 : 4 Docs. : 0.050000](#)(**cobalt**:1.5694, **value**:1.5335, **hydrometallurgical**:1.2958, **recovery**:1.2844, **copper**:1.0498, ...)
 - [7 : 53 : 3 Docs. : 0.105263](#)(**electrogenerative**:7.0000, **chloride**:3.9487, **cell**:3.4899, **batch**:3.2906, **vitreous**:3.2521, ...)

9(2):

- 216 : 7 Docs. : [0.015625](#) (**lithium-manganese-rich**:2.0857, **china**:1.3966, **electric vehicle**:1.3904, **wastewater**:1.3904, **lithium-ion battery graphite**:1.3904)
 - [12 : 281 : 2 Docs. : 0.053571](#)(**graphene oxide**:3.0000, **lithium-manganese-rich**:2.1124, **lithium-manganese-rich cathode** ...)
 - [32 : 1774 : 5 Docs. : 0.013072](#)(**china**:3.4957, **electric**:2.3959, **recycl**:2.2275, **vehicle**:2.0038, **battery**:1.5375)

圖 16 為書目對分析結果

There are 14 clusters, 47 items

6 clusters contain 2 items
4 clusters contain 4 items
2 clusters contain 5 items
1 clusters contain 3 items
1 clusters contain 6 items

1(6):

- 326 : 14 Docs. : [0.1431 \(material:27.3223, lithium-ion battery:16.6092, lib:14.7168, spent:4.0072, environmental:3.6926\)](#)
 - 132 : 8 Docs. : [0.2492 \(material:14.3056, lithium-ion battery:8.8282, spent:7.6114, lib:5.3720, recover:0.8088\)](#)
 - 62 : 6 Docs. : [0.3158 \(material:10.8557, lithium-ion battery:6.1409, spent:3.6986, lib:1.2566\)](#)
 - 8 : 4 Docs. : [0.4727 \(biochar:11.1901, bioma:9.7913, electrode material:7.6932, biochar material:7.6932, pyrolyst:6.9938\)](#)
 - [38 : 43 : 2 Docs, 0.41\(bioma:14.00, biochar:9.16, microwave:8.95, pyrolysi:8.95, electrode material:7.04, microwave](#)
 - [4 : 47 : 2 Docs, 0.33\(parameter:4.21, real-time:2.82, model:2.50, real-time model:2.11, fractionation:2.11, direct...](#)
 - [44 : 44 : 2 Docs, 0.36\(electrokinetic:3.52, active:3.41, pigment:2.82, ceramic pigment:2.11, active cathode:2.11, ceramic...](#)
 - [11 : 38 : 2 Docs, 0.29\(transformation:4.23, thermal transformation:3.52, spent lib:3.25, selective thermal transformation...](#)
- 21 : 6 Docs. : [0.4076 \(electrochemical:9.6885, energy:9.0970, direct recycl:6.9938, global:6.9938, sustainable:5.5109\)](#)
 - [21 : 24 : 3 Docs, 0.24\(future:6.15, global:6.15, challenge:5.80, energy:4.52, storage:3.40, renewable:3.25, resource...](#)
 - [45 : 16 : 3 Docs, 0.35\(direct recycl:8.00, cathode:3.12, cathode material:2.45, proces:2.23, electrochemical:1.67...](#)

2(5):

- 425 : 17 Docs. : [0.1168 \(leach:13.0508, solution:12.1012, oxide:6.6286, recovery:6.1663, cobalt:5.1081\)](#)
 - 222 : 5 Docs. : [0.1893 \(slag:7.1667, saf:4.8957, closed-loop:4.8957, batch-mode:4.1963, lithium:3.9208\)](#)
 - [1 : 22 : 3 Docs, 0.34\(slag:12.30, recovery:1.80\)](#)
 - [10 : 28 : 2 Docs, 0.29\(simulation:4.07, sulphate:4.00, electrodialysis:3.41, batch-mode:2.82, closed-loop:2.46, two...](#)
 - 94 : 12 Docs. : [0.2860 \(cobalt:15.5877, leach:12.7211, solution:11.4416, oxide:9.0814, spent:8.0091\)](#)
 - 15 : 8 Docs. : [0.4313 \(zinc:14.6870, cobalt:9.2141, catalyst:9.0919, precipitation:8.8811, temperature:8.0000\)](#)
 - [3 : 2 : 5 Docs, 0.12\(catalyst:10.76, cobalt:5.21, solution:4.88, strip:3.88, leach:2.68, extraction:2.47, acid:2...](#)
 - [36 : 14 : 3 Docs, 0.18\(zinc:18.71, iron:7.00, copper:4.19, sodium:3.30, cadmium:3.25, precipitation:2.94, recovery...](#)
 - [46 : 4 : 4 Docs, 0.34\(spent lithium-ion battery:11.58, acid:3.89, environmentally:3.40, recycl:2.83, hydrometallurgical...](#)

3(5):

- 358 : 17 Docs. : [0.1331 \(leach:21.6119, extraction:19.3706, solvent:19.1000, cobalt:18.3903, recovery:9.3026\)](#)
 - 6 : 5 Docs. : [0.4841 \(ore:12.9180, mineral:6.2944, heterogenite:5.5950, leach:5.2820, reduc:4.3000\)](#)
 - [0 : 23 : 3 Docs, 0.34\(ore:10.76, reduc:6.29, sulfuric:4.61, nickel:3.50, leach:2.34, solution:2.06, acid:1.44, selective...](#)
 - [43 : 45 : 2 Docs, 0.37\(mineral:5.69, heterogenite:4.23, mineralogical:3.52, practice:2.82, katanga:2.82, drc:2.11...](#)
 - 72 : 12 Docs. : [0.3061 \(solvent:25.6838, extraction:18.4227, solvent extraction:10.4959, leach:9.8134, cobalt:8.9072\)](#)
 - 9 : 10 Docs. : [0.4577 \(solvent:14.5155, black ma:11.8894, eutectic:10.4907, deep eutectic:9.0919, efficiency:8.8440\)](#)
 - [19 : 8 : 4 Docs, 0.52\(black ma:18.00, extraction:2.77, metal:1.96, composition:1.94, material:1.93, current:1.42, spent...](#)
 - [8 : 1 : 6 Docs, 0.11\(solvent:16.01, eutectic:13.64, deep:12.38, cathode:6.95, deep eutectic:6.29, leach:5.21, recycl...](#)
 - [25 : 48 : 2 Docs, 0.23\(cyanex:5.12, extraction:3.25, solvent extraction:2.96, cobalt sulfate:2.82, condition:2.62...](#)

4(4):

- 434 : 10 Docs. : [0.1128 \(cobalt:21.7836, cobalt recovery:10.1744, system:8.9400, mol:5.4419, cell:3.4030\)](#)
 - 40 : 5 Docs. : [0.3556 \(mol:8.2946, electrogenerative:7.6932, cobalt:7.6409, aqueou:5.5950, cell:5.5109\)](#)
 - [16 : 20 : 3 Docs, 0.27\(electrogenerative:11.00, chloride:6.39, influence:4.19, batch:4.07, system:2.99, cobalt:2...](#)
 - [7 : 31 : 2 Docs, 0.56\(microbial:6.00, aqueou:5.00, production:4.77, hydrogen:4.23, cobalt dihydroxide:4.23, oxygen...](#)
 - 2 : 5 Docs. : [0.6149 \(ammonia:14.6870, distillation:9.0919, cobalt recovery:7.6034, ammonia distillation:6.9938, decomplexation:4.8957\)](#)
 - [14 : 13 : 3 Docs, 0.28\(ammonia:16.27, distillation:12.00, ammonia distillation:8.13, cobalt:3.66, product:3.35, condition...](#)
 - [2 : 40 : 2 Docs, 0.33\(decomplexation:4.23, cobalt recovery:4.20, rotate:2.82, electrify:2.82, cylindrical:2.82, complexe...](#)

5(4):

- 320 : 12 Docs. : [0.1446 \(cathode:19.1042, cathode material:14.0066, recover:13.5796, foil:10.3682, recycl:6.9780\)](#)
 - 105 : 10 Docs. : [0.2724 \(cathode material:16.6493, recover:10.4232, recycl:5.1667, battery:4.3301, metal:2.9831\)](#)
 - 3 : 7 Docs. : [0.5518 \(cathode material:11.6092, li-ion battery:6.9938, recover:5.5024, lithium:4.7610, leach:4.6952\)](#)
 - [26 : 21 : 3 Docs, 0.49\(li-ion battery:9.00, different:3.35, material:1.77, recover:1.60, recovery:1.41, cobalt:1.24...](#)
 - [35 : 5 : 4 Docs, 0.18\(cathode material:7.83, spent:2.37, critical:2.14, optimize:2.14, recover:1.27, leach:1.11, recycl...](#)
 - [7 : 31 : 2 Docs, 0.47\(adsorption:4.20, selective separation:3.52, nuclear:3.52, adsorption capacity:3.25, polymer...](#)
 - [9 : 19 : 3 Docs, 0.11\(graphite:6.83, synthesis:3.02, metal:2.81, treatment:2.01, recover:1.37, oxide:1.23, material...](#)
 - [23 : 25 : 2 Docs, 0.67\(particle:12.20, puls:11.00, discharge:8.95, foil:8.95, high-voltage puls discharge:7.00, aluminum...](#)

6(4):

- 57 : 17 Docs. : [0.3269 \(vehicle:33.5907, electric:31.8228, electric vehicle:30.0000, recycl:18.1050, battery:17.1965\)](#)
 - 1 : 8 Docs. : [0.6582 \(vehicle:18.3303, electric:16.4973, electric vehicle:15.2067, supply:12.2202, emission:11.8894\)](#)
 - [18 : 9 : 4 Docs, 0.25\(battery-recycl:16.00, manufacturer:8.50, market:8.50, government:8.42, electric:8.03, vehicle...](#)
 - [22 : 7 : 4 Docs, 0.23\(emission:13.45, carbon:12.42, vehicle:8.10, profit:6.32, electric:4.65, technology:3.87, supply...](#)
 - 13 : 9 Docs. : [0.4418 \(lithium-ion battery:11.4416, research:8.8811, development:8.3925, economy:7.1667, economic:6.9938\)](#)
 - [14 : 11 : 4 Docs, 0.28\(circular economy:12.08, development:6.14, economic:5.39, industry:5.02, lib:4.67, recycl:4...](#)
 - [47 : 3 : 5 Docs, 0.13\(lithium-ion battery:8.24, recycl:0.52\)](#)

7(4):

- 162 : 12 Docs. : [0.2227 \(cobalt:16.5815, separation:16.2944, adsorption:14.5349, selective:11.8430, membrane:10.8837\)](#)
 - 41 : 5 Docs. : [0.3523 \(resin:11.1901, adsorption:11.0594, cobalt:6.2925, separation:5.6315, selective separation:5.5950\)](#)
 - [27 : 14 : 3 Docs, 0.22\(resin:9.89, column:6.90, ion:3.84, data:2.64, organic:1.82, cobalt:1.57, metal:1.53, model:0...](#)
 - [29 : 27 : 2 Docs, 0.47\(adsorption:4.20, selective separation:3.52, nuclear:3.52, adsorption capacity:3.25, polymer...](#)
 - 7 : 7 Docs. : [0.4819 \(membrane:16.5892, strip:8.0737, selective:7.5593, cobalt and nickel:6.9938, extraction:5.7208\)](#)
 - [20 : 18 : 3 Docs, 0.52\(cobalt and nickel:11.00, selective:3.06, solution:2.65, stage:2.51, separation:2.13, recovery...](#)
 - [37 : 12 : 4 Docs, 0.18\(membrane:13.08, cyanex:4.25, extraction:2.70, liquid:2.12, concentration:1.87, strip:1.77...](#)

8(3):

- 210 : 8 Docs. : [0.1914 \(anode:23.0000, capacity:7.0833, li-ion:5.7955, active:4.5076, battery:4.1858\)](#)
 - 24 : 6 Docs. : [0.3946 \(anode:12.9180, layer:9.0919, capacity:8.8811, composite:7.6932, equalization:6.9938\)](#)
 - [24 : 41 : 2 Docs, 0.23\(equalization:4.93, dynamic equalization:4.23, cell:4.13, methodology:4.07, second-life battery...](#)
 - [33 : 6 : 4 Docs, 0.18\(layer:11.22, composite:6.90, spent:4.47, coate:3.51, surface:3.00, regenerate:2.83, material...](#)
 - [41 : 33 : 2 Docs, 0.16\(contaminant:4.93, anode:3.51, metallic:2.96, metallic contaminant:2.82, li-ion:2.29, acid leach...](#)

9(2):

- 16 : 6 Docs. : [0.4221 \(secondary:19.0000, nickel:15.2753, production:10.9982, supply:10.9982, manufactur:10.4907\)](#)
 - [31 : 39 : 2 Docs, 0.42\(manufactur:8.45, alib:7.75, nickel:3.36, energy consumption:3.25, technology:3.01, evs:2.81...](#)
 - [32 : 10 : 4 Docs, 0.19\(secondary:15.13, primary:7.92, demand:6.20, cobalt:5.12, supply:4.47, recycl:3.83, resource...](#)

10(2):

- 5 : 4 Docs. : [0.4883 \(biobleach:9.7913, acid:8.2809, phosphorou:6.2944, citric:6.2111, leach efficiency:5.6516\)](#)
 - [17 : 30 : 2 Docs, 0.27\(biobleach:11.39, earth:7.00, rare:7.00, element:4.88, phosphorou:4.23, base metal:3.52, rec:3...](#)
 - [42 : 29 : 2 Docs, 0.37\(citric:7.32, system:5.20, cit system:2.82, cobalt-bearing waste:2.82, acid:2.50, citric acid...](#)

11(2):

- 129 : 5 Docs. : [0.2530 \(extractant:11.1901, powder:5.5950, metal:5.3211, metal separation:3.4969, oer:3.4969\)](#)
 - [13 : 17 : 3 Docs, 0.28\(extractant:13.80, separation:3.32, metal:1.69, application:1.29, solution:1.20, extraction...](#)
 - [5 : 32 : 2 Docs, 0.33\(degree c:3.25, boloe:2.82, powder:2.46, oxygen evolution reaction:2.11, metal powder:2.11, oer...](#)

12(2):

- 161 : 4 Docs. : [0.2228 \(operation:8.3925, leachate:6.9938, delonization:4.8957, capacitive delonization:4.8957, flow-electrode:4.1963\)](#)
 - [12 : 35 : 2 Docs, 0.29\(leachate:6.32, capacitive deionization:2.82, flow-electrode:2.11, surrogate:2.11, cem:2.11...](#)
 - [34 : 37 : 2 Docs, 0.41\(operation:6.51, industrial:3.67, output:2.82, lib recycl:2.50, g using lewatit:2.11, ion-exchange...](#)

13(2):

- 293 : 4 Docs. : [0.1583 \(system:9.3095, subsidy:5.7333, lead:4.1963, electrodeposition:4.1963, recycl subsidy:4.1963\)](#)
 - [28 : 36 : 2 Docs, 0.47\(policy:6.25, dynamic:5.00, subsidy:5.00, system:4.51, recycler:4.07, game:2.96, recycl subsidy...](#)
 - [40 : 34 : 2 Docs, 0.39\(electrodeposition:3.52, ionic:3.51, liquid:3.15, methanesulfonate:2.82, cobalt-free:2.82...](#)

14(2):

- 163 : 4 Docs. : [0.2224 \(county:7.6932, spent alkaline:6.9938, alkaline:6.9938, brand:5.5950, butler county:4.8957\)](#)
 - [30 : 26 : 2 Docs, 0.43\(spent alkaline:4.93, county:4.93, brand:4.93, butler county:3.52, spent alkaline battery:3.52...](#)
 - [39 : 42 : 2 Docs, 0.16\(lithium ion:2.82, mak:2.82, aqs:2.11, decision mak:2.11, microrecycl:2.11, multi-criteria:2...](#)

圖 17 為共現字分析結果

根據書目對的聚類結果，本研究深入了解其中的知識結構以及聚類結果的詳細情況，從主題聚類分析結果圖 18 顯示 CATAR 計算 Cluster 1 的主題如「鋰離子、溶解、廢棄物」的多樣性指數 $1/HHI$ 為 3.36，意即該主題的研究相當於約有 3.36 個國家投入，主要國家包括中國、美國、澳洲、台灣。「鋰離子、溶解、廢棄物」的研究主題，而 $1/HHI$ 數值越高，代表研究投入的國家越多元。而 Cluster 2 聚類的研究主題有「鋰離子、負極、電池、回收」多樣性指數 $1/HHI$ 為 5.62，說明 Cluster 2 受到較多國家的關注並投入研究，目前約有 5.62 個國家投入其中，又以美國最多中國第二也包含了德國、澳洲、印度、義大利及香港。然而，除了 Cluster 1 及 Cluster 2 外，其餘的書目對聚類從研究多樣性的指數來看皆不超過 2，顯示出其他的研究主題領域，相對於 Cluster 1 及 Cluster 2 受到較少的關注且研究較集中於某些國家的情形；同時，從研究的趨勢來看(圖 19) Cluster 1 及 Cluster 2 自 2020 年來開始受到學者的矚目而數量爬升進而形成主題聚類，而 Cluster 3、Cluster 4 及 Cluster 5 也隨著時間經過慢慢累積相關研究進而形成主題聚類，但是可從圖 18 底部的斜率看出其增加的速度並不如 Cluster 1 及 Cluster 2。而 Cluster 6、Cluster 7 及 Cluster 8 的研究則較集中於某一時期，可以推測這些聚類的主題較易隨著時間、科技創新、政策等因素影響，進而在當時形成一聚類。但值得注意的是 Cluster 9 2024 年有較多的論文發表，顯示「富鋰錳電池、中國、電動車、廢水」於近年興起並形成一新興主

題。另外，值得注意的是如概觀分析的結果，圖 18 說明各聚類結果都可以看到中國及美國投入較多其中又以中國最多，足見中國對於車用電池回收研究領域的重視及其領導地位。

綜合書目對分析的結果可發現，研究主題間的聚類結構清晰，且部分主題如 Cluster 1 與 Cluster 2 受到多國學者關注，呈現出較高的研究多樣性與成長的趨勢。相較之下，其餘聚類則呈現研究多樣性較低或集中於特定時期的情形，反映出主題本身可能具有技術門檻、政策誘因等。Cluster 9「富鋰電池、中國、電動車、廢水」於近年興起在 2024 年有較多的論文發表具備成長潛力。此外，從國家參與的角度來看，中國與美國在多數聚類中皆投入顯著特別是中國幾乎橫跨所有主題，顯示其在車用電池回收研究領域的影響力。

Cluster 1	Cluster 2		Cluster 3		Cluster 4		Cluster 5		Cluster 6		Cluster 7		Cluster 8		Cluster 9	
163 : 21 Docs.	90 : 32 Docs.		277 : 10 Docs.		143 : 6 Docs.		234 : 10 Docs.		70 : 7 Docs.		58 : 4 Docs.		27 : 7 Docs.		216 : 7 Docs.	
Total_	14	Total_	31	Total_	10	Total_	4	Total_	5	Total_	6	Total_	3	Total_	5	Total_
HHI_	0.28	HHI_	0.18	HHI_	0.68	HHI_	0.62	HHI_	0.52	HHI_	0.56	HHI_	0.56	HHI_	0.52	HHI_
1/HHI_	3.63	1/HHI_	5.62	1/HHI_	1.47	1/HHI_	1.6	1/HHI_	1.92	1/HHI_	1.8	1/HHI_	1.8	1/HHI_	1.92	1/HHI_
CHINA	5	USA	9	CHINA	8	USA	3	POLAND	3	CHINA	4	SWEDEN	2	MALAYSIA	3	CHINA
USA	4	CHINA	6	UK	2	CZECH REPUBLIC	1	IRAN	2	AUSTRIA	2	ITALY	1	BANGLADESH	2	ITALY
AUSTRALIA	3	GERMANY	4													
TAIWAN	2	AUSTRALIA	4													
		INDIA	3													
		ITALY	3													
		Hong Kong	2													

圖 18 為書目對分析研究多樣性結果

	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4	Cluster 5	Cluster 6	Cluster 7	Cluster 8	Cluster 9
	163 : 21 Docs.	90 : 32 Docs.	277 : 10 Docs.	143 : 6 Docs.	234 : 10 Docs.	70 : 7 Docs.	58 : 4 Docs.	27 : 7 Docs.	216 : 7 Docs.
2006	0	0	0	0	0	0	0	1	0
2008	0	0	0	0	0	0	0	1	0
2009	0	0	0	0	0	0	0	1	0
2012	1	0	0	0	0	0	0	1	0
2013	0	1	0	0	0	0	0	1	0
2014	0	0	0	0	0	0	0	1	0
2016	1	0	0	0	0	0	0	1	0
2017	0	1	0	0	1	0	0	0	0
2018	0	1	0	1	0	0	0	0	0
2019	2	0	2	0	1	0	0	0	0
2020	1	2	1	0	1	2	0	0	0
2021	2	4	1	0	2	0	1	0	1
2022	4	3	2	3	2	1	2	0	0
2023	2	8	2	0	1	4	1	0	1
2024	7	12	2	2	2	0	0	0	5
2025	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Slope	0.29	0.56	0	0.07	0.05	0	0	0	0.3

圖 19 為書目對分析研究聚類年份分布圖

而為了要更全面的了解車用電池回收領域內的研究主題及趨勢，本研究亦針對共現字分析進行分析並與書目對分析形成互補，以避免有文獻與文獻之間有共同主題，但可能因為引用的文獻有所不同而無法形成聚類的情形。圖 20 為共現字分析的主題聚類分析結果顯示，相較於書目對分析的結果共現字產出的主題聚類較多涵蓋範圍也較為廣泛。圖 20 說明 Cluster 1、Cluster 2、Cluster 3、Cluster 13、Cluster 14 有較多的國家投入其研究主題中，且可以發現中國對於許多聚類中主題皆投入其中。Cluster 1 的聚類主題包含「材料、鋰離子電池、消耗」，但令人訝異的是在該聚類中屬澳洲的研究最多可能是因為澳洲目前是全球最大的鋰生產國，再來才是美國及中國甚至是德國、西班牙多樣性指數 $1/HHI$ 為 4.45，也是在書目對分析中沒有辦法辨識出來的研究結果。而 Cluster 2 的聚類主題包含「析出、溶解、氧化物、回收」且就如前段章節所提及書目對分析可能有其限制，在共現字分析上可以額外看到在車用電池回收研究領域內有關於金屬氧化物回收方法的討論而形成聚類，並由中國在該聚類主題中佔據主導地位其餘如印度、德國、波蘭之間的關注度沒有明顯的差距且多樣性指數 $1/HHI$ 為 3.38。Cluster 3 的聚類主題「析出、萃取、溶劑、鈷」主要探討金屬礦物的回收方法許多國家皆投入該聚類進行研究，包含美國、俄國、英國、中國、澳洲以及德國，且論文的產出數量較為平均並從多樣性指數可以看出 $1/HHI$ 為 5.76，屬較受國際關注的主題聚類。值得注意的是 Cluster 4 主題為「鈷、

鈷回收率、電池組」，根據概觀分析的三域圖說明中國對於鈷的回收有較多的投入，在共現字分析結果亦指出針對於鈷的回收及其回收率的討論亦屬中國最多馬來西亞次之，而多樣性指數 $1/HHI$ 為 2.79。

然而僅憑圖 20 的結果並無法看出其研究主題的趨勢及關注度。圖 21 說明 Cluster 1 於 2019 年開始論文的出版數急遽上升斜率達 0.97，可以看出「材料、鋰離子電池、消耗」相關主題的討論在近年來成為熱門的研究主題，並且仍然有持續增加的趨勢。從 Cluster 2 主題「析出、溶解、氧化物、回收」及 Cluster 3 主題「析出、萃取、溶劑、鈷」的年度論文出版數及斜率說明都有成長的趨勢，而從圖 21 可以說明 Cluster 3 為 2023、2024 年的熱門主題可以推測未來可能會有更多的研究人員投入，也意味著車用電池回收研究的主題不再只有關注於鋰離子更擴展到了鈷及溶劑萃取金屬等領域。有趣的是 Cluster 4 主題為「鈷、鈷回收率、電池組」，雖然過去有一時期學者投入研究但自 2017 年到 2021 年沉寂了一段時間，並與 Cluster 3 在 2022 年後開始有了較多的研究及討論，這兩者主題聚類之間是否有一定的相關性又或者是否在技術上存在重疊有待研究驗證。Cluster 5「負極、負極材料、回收、箔」則為 2018 年起在車用電池回收研究領域內興起的主題且有穩定的成長趨勢並且在該主題的相關研究集中於日本及中國多樣性指數 $1/HHI$ 為 1.92。

研究結果中 Cluster 6 的論文出版篇數的成長幅度數第二，主題為「車

輛、電動、電動車、回收」相關的討論也在電動車不斷創新高的銷量背景下該主題在 2020 年開始有研究人員投入，截至 2025 年初斜率為 0.6 並在 2024 年有 10 篇的論文出版；在逐漸成長的趨勢下中國在聚類中扮演著舉足輕重的角色，具有較多的論文出版數而英國次之印度最後。Cluster 7

「鈷、分離、吸附」的討論則是從 2021 年才有明顯增加，但是從圖 20 說明該聚類僅有南韓及美國進行相關研究，而對於鈷較有研究的中國卻缺席推測有關於鈷方面的分離回收等相關領域可能成為中國以外國家研究的目標但是否能夠成為一新興的研究趨勢仍有待考驗，但不排除中國目前在此領域尚未投入或者資料庫尚未涵蓋相關研究等原因。

最後，Cluster 8~Cluster 14 雖然其斜率皆不超過 0.03，又或者因為樣本數量不足而無法計算出斜率的聚類仍具意義；過去針對於這些主題聚類的討論較少甚至過去從未出現過相關的討論，因此未來經過研究人員、各國、企業的創新可能進而搖身一變成為研究趨勢。從圖 21 可以看出如 Cluster 8「正極、可行性、鋰離子」、Cluster 9「二次利用、鎳、生產、供應」、Cluster 11「萃取、粉末、金屬、金屬分離」近年有較密集的研究，也吸引了如中國、美國、日本等國家的研究人員投入研究。而 Cluster 10、Cluster 12、Cluster 13、Cluster 14 論文出版的年代分布較為分散且文獻篇數較少，可能主題需要政策推動或技術門檻較高而關注度相對較低。

總結圖 20 與圖 21 之分析結果可知，共現字分析不僅補足書目對分析

在主題辨識上的限制，更能捕捉車用電池回收研究中潛藏的重要主題。

Cluster 1 至 Cluster 6 顯示的成長趨勢特別是與材料、金屬回收（如鈷、鋰）及萃取技術相關的主題，已成為近期及未來的研究熱點。此外，從多樣性指數可觀察出不同主題中各國參與程度的差異，指出全球研究的分布與國際合作的可能性。而 Cluster 8、Cluster 9 及 Cluster 11 目前研究篇數與成長斜率相對較低，但其可能性與潛在價值亦不容忽視，未來在政策推動與產業技術創新的帶動下有望成為下一波的研究焦點。

Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4	Cluster 5	Cluster 6	Cluster 7
326 : 14 Docs.	425 : 17 Docs.	358 : 17 Docs.	434 : 10 Docs.	320 : 12 Docs.	57 : 17 Docs.	162 : 12 Docs.
Total_ 14	Total_ 14	Total_ 11	Total_ 9	Total_ 5	Total_ 15	Total_ 5
HHI_ 0.22	HHI_ 0.3	HHI_ 0.17	HHI_ 0.36	HHI_ 0.52	HHI_ 0.45	HHI_ 0.52
1/HHI_ 4.45	1/HHI_ 3.38	1/HHI_ 5.76	1/HHI_ 2.79	1/HHI_ 1.92	1/HHI_ 2.23	1/HHI_ 1.92
AUSTRAL 4	CHINA 6	USA 2	CHINA 4	JAPAN 3	CHINA 9	SOUTH K 3
USA 3	INDIA 3	RUSSIA 2	MALAYSIA 3	CHINA 2	UK 4	USA 2
GERMANY 3	POLAND 3	UK 2	MEXICO 2		INDIA 2	
CHINA 3	GERMANY 2	CHINA 2				
SPAIN 1		AUSTRAL 2				
		GERMANY 1				

圖 20 為共現字分析研究多樣性結果

Cluster 7	Cluster 8	Cluster 9	Cluster 10	Cluster 11	Cluster 12	Cluster 13	Cluster 14
162 : 12 Docs.	210 : 8 Docs.	16 : 6 Docs.	5 : 4 Docs.	129 : 5 Docs.	161 : 4 Docs.	293 : 4 Docs.	163 : 4 Docs.
Total_ 5	Total_ 5	Total_ 5	Total_ 3	Total_ 3	Total_ 4	Total_ 5	Total_ 4
HHI_ 0.52	HHI_ 0.52	HHI_ 0.68	HHI_ 0.56	HHI_ 0.56	HHI_ 0.62	HHI_ 0.2	HHI_ 0.25
1/HHI_ 1.92	1/HHI_ 1.92	1/HHI_ 1.47	1/HHI_ 1.8	1/HHI_ 1.8	1/HHI_ 1.6	1/HHI_ 5	1/HHI_ 4
SOUTH K 3	USA 3	CHINA 4	CHINA 2	JAPAN 2	USA 2	CHINA 3	JAPAN 1
USA 2	CHINA 2	FINLAND 1	GERMANY 1	INDIA 1	SOUTH K 1	UK 1	AUSTRAL 1
						INDIA 1	USA 1
						GERMANY 1	INDIA 1
						USA 1	

(續)圖 20 為共現字分析研究多樣性結果

	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4	Cluster 5	Cluster 6	Cluster 7	Cluster 8	Cluster 9	Cluster 10	Cluster 11	Cluster 12	Cluster 13	Cluster 14
	326 : 14 Docs.	425 : 17 Docs.	358 : 17 Docs.	434 : 10 Docs.	320 : 12 Docs.	57 : 17 Docs.	162 : 12 Docs.	210 : 8 Docs.	16 : 6 Docs.	5 : 4 Docs.	129 : 5 Docs.	161 : 4 Docs.	293 : 4 Docs.	163 : 4 Docs.
1995	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2000	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2001	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
2005	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2006	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2007	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
2008	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2009	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
2011	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2012	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2013	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
2014	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2015	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
2016	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2017	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
2018	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
2019	1	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0
2020	1	2	0	0	1	2	0	1	0	0	0	0	1	0
2021	2	1	0	0	3	0	2	1	0	1	1	0	1	0
2022	0	1	2	1	1	2	4	2	1	0	1	2	0	2
2023	3	2	5	2	1	3	0	1	3	0	1	0	0	0
2024	7	4	6	1	2	10	2	0	2	1	1	2	1	0
2025	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Slope	0.97	0.11	0.09	0.01	0.06	0.6	0.05	0.03	0	0.01	0.03	0	0	0

圖 21 為共現字分析研究聚類年份分布圖

第五章 結論建議與研究限制

第一節 結論

本研究以 1995 年至 2025 年間 Web of Science 資料庫所收錄之車用電池回收相關文獻為研究對象，並運用文獻計量方法進行系統性分析，透過 RGui 執行概觀分析，並以 CATAR 工具進行書目耦合與共現字分析，發現研究結果顯示車用電池回收相關研究自 2017 年起快速成長並在電動車普及與環境永續議題興起的背景下，車用電池回收已成為全球學術界與產業界高度關注的焦點，以下將分為兩部分進行說明：

一、車用電池回收研究之概觀分析

年度趨勢方面 1995 年至 2016 年間，車用電池回收領域的研究量相對零星每年發表數不高，平均僅維持在個位數；然而自 2017 年起文獻數量呈現明顯成長，顯示全球電動車產業擴張與永續議題受到重視後，學術界對於回收問題的關注迅速升溫。這一轉折與多國政府推動再生資源政策如中國《新能源汽车动力蓄电池回收利用溯源管理暂行规定》的時間點重疊。從期刊分析發現，研究成果多發表於《*Separation and Purification Technology*》、《*Journal of Power Sources*》、《*Hydrometallurgy*》等期刊，說明研究重點以濕式冶金、材料純化與電池系統能源應用為主，且特別是《*ACS Sustainable Chemistry & Engineering*》的發表數量也日益增加，說

明研究逐漸拓展至永續化學與綠色製程；此外，文字雲與主題趨勢圖進一步指出，研究核心聚焦於「recovery」、「separation」、「lithium-ion batteries」、「cobalt」等字詞說明以技術與材料為導向的研究脈絡。

從作者研究合作、機構分析、國家論文出版分析的結果顯示，中國、美國為最主要的研究推動國。中國論文數量快速成長，且集中於鈷回收與電池全生命週期管理相關議題，說明中國在政府政策推動下逐漸建立產學研合作體系，並於國際期刊中發表具代表性的成果。美國則以能源部等研究機構的介入亦強化了政策與技術的整合研究。

從最具影響力的論文與期刊來說，文獻方面屬《Georgi-Maschler T., 2012, *J Power Sources*》，其次則是《Ferreira DA., 2009, *J Power Sources*》以 331 次被引用排名第二。雖然《Separation and Purification Technology》收錄較多的文獻，但《*J Power Sources*》出現多篇高被引論文，說明該期刊在電池及其回收技術研究方面的領導地位。

二、車用電池回收研究之書目對分析與共現字分析。

書目對分析結果將文獻聚類為八大主題聚類，其中 Cluster 1「鋰離子、溶解、廢棄物」與 Cluster 2「鋰離子、負極、電池、回收」受到最多國家的投入，具備較高的研究多樣性與成長趨勢，為目前關注度最高的主題群。相較之下，其他聚類主題則呈現時期集中或研究密度較低的特徵，說明可能受到技術門檻或政策的影響。此外，特別值得注意的是 Cluster 9 於

近年快速成長，具備成為新興主題的潛力。

共現字分析補充了書目對分析可能無法完全描繪的主題，找出更多具潛在價值的主題聚類。分析結果共分為 14 個主題聚類，其中多數聚類與鋰離子電池回收、金屬萃取與材料處理技術密切相關。特別值得關注的是 Cluster 1「材料、鋰離子電池、消耗」、Cluster 2「析出、溶解、氧化物、回收」與 Cluster 3「析出、萃取、溶劑、鈷」顯示出較高的國際參與度與研究熱度，並呈現出明顯的成長趨勢。Cluster 3 尤其在 2023 至 2024 年間論文數量快速上升，正在成為未來研究的重要趨勢。此外，Cluster 4「鈷、鈷回收率、電池組」與 Cluster 3 同為在 2022 年後才開始有了較多的研究及討論，這兩者主題聚類之間是否有一定的相關性又或者是否在技術上存在重疊有待研究驗證。Cluster 5「負極、負極材料、回收、箔」亦逐步受到重視，顯示在電池組的結構材料與功能元件的回收研究正逐漸受到學界關注。共現字分析亦說明如 Cluster 6「車輛、電動、電動車、回收」等與整體車輛應用與政策層面相關的主題，開始在電動車普及的背景之下累積文獻量，而 Cluster 7「鈷、分離、吸附」的討論則是從 2021 年才有明顯增加。值得注意的是部分目前文獻數量較少或尚未廣泛討論的主題聚類，如 Cluster 8「正極、可行性、鋰離子」、Cluster 9「二次利用、鎳、生產、供應」與 Cluster 11「萃取、粉末、金屬、金屬分離」等，在近年已有逐漸累積趨勢，顯示具備潛在的可能性未來隨著技術突破與法規政策

的推動，有望成為新一波研究重點。總結來說，共現字分析提供更全面的車用電池回收領域的主題與趨勢演變，特別是在新興主題與跨領域連結上展現出其價值。本研究描繪出車用電池回收領域的知識架構與研究脈絡。結果顯示技術創新與材料回收仍為研究主軸，並逐漸拓展至永續性與政策制度等面向。本研究之分析結果亦發現中國、美國在該領域具有高度的學術產出與影響力形成特定機構與國家主導的知識網絡呈現出知識較為集中的現象。

各國研究的關注點雖有差異，但皆朝向資源效率與產業實務整合邁進，顯示該領域已進入多元化發展階段。透過書目對與共現字分析，不僅能掌握主題演進的全貌，也為後續研究者提供了探索核心議題與研究缺口的重要依據。

第二節 建議

根據本研究對車用電池回收相關文獻之計量分析結果，顯示出該領域在 2017 年後呈現顯著成長，尤其集中於鋰離子電池與鈷的回收技術，同時與政策制定、環境永續及供應鏈管理等主題相關。綜合研究結果，本文對企業界、政策制定者及未來研究者提出如下建議。首先，針對企業界而言，應及早布局並積極投資於前瞻性的電池回收技術，特別是濕式冶金、直接回收、生物回收等具高潛力之方案，以因應未來即將汰除大量電池。企業亦應重視電池回收於整體價值鏈中的策略角色，從電池製造商考慮可拆解性與再利用性，提升材料回收率並創造循環經濟效益。此外，企業應與上、中、下游夥伴建立合作產業鏈，導入如數位電池護照等工具，提高材料流向與環保績效的透明度，藉此回應市場與監管機構對永續責任的日益重視。再者，針對政策制定者而言，應積極推動相關回收制度與法規標準之建構，包括建立電池回收的分類管理制度、明確規範回收作業流程與品質要求，並逐步導入擴大生產者責任，以提升企業回收責任與回收比率。另建議政府部門應提供稅務誘因，鼓勵回收技術研發與商業化應用，同時建置全國性電池回收資料平台，整合退役電池的流向與回收情形，以利資源管理與政策調整。此外，面對電池產業的全球化發展，建議我國應積極參與國際回收合作倡議，尤其在回收技術規範、資料互通與環保標準等層面，與主要經濟體保持一致，提升產業競爭力。最後，針對未來研究

者，本研究現有文獻多集中於中國、美國與日本等國，後續研究應強化我國或其他新興市場於政策制度、產業鏈運作與地方回收實踐之實證研究，以補足區域研究的不足。研究方法方面，亦建議未來可結合政策分析模型等工具，評估不同回收政策或激勵方案之效益與可行性，進一步提供更具策略性與操作性的政策建議。總結來說車用電池回收議題已橫跨環境、產業與科技等多面向，唯有學界、產業界與政策部門協同合作，才能在有限資源與日益嚴峻的環境挑戰中，共同建立出一個高效且永續的電池回收體系。

第三節 研究限制

本研究雖以系統性的文獻計量方法，針對車用電池回收領域進行深入探討，並運用 CATAR 與 RGui 軟體進行概觀分析、書目耦合與共現字分析，成功建構出相關領域的知識地圖與主題網絡，但仍存在若干限制，亦可為後續研究提供改進與延伸的方向。首先，在資料來源方面本研究僅以 Web of Science (WoS) 資料庫作為主要文獻蒐集來源，雖具代表性且品質控制嚴謹，惟 Scopus、IEEE Xplore、Google Scholar 等其他資料庫亦可能收錄具實務價值與前沿性的研究成果，尤其在技術創新或專利資料方面，可能遺漏部分非英語文獻，未能全面涵蓋全球研究現況。未來研究可考慮多元資料庫交叉比對，以增加資料來源的全面性與多樣性。其次，在分析工具與方法選擇上，儘管本研究已應用文獻計量中常見的概觀分析、書目耦合與共現字分析進行主題聚類，但未能使用視覺化技術，將結果呈現更加具體。再者本研究以 1995 年至 2025 年之 WoS 收錄文獻為分析範圍，聚焦於學術研究建議未來研究可結合產業個案研究、政策評估模型或訪談調查提升研究的實務貢獻。最後，由於文獻計量研究屬於二手資料分析，其研究結論仍受到關鍵字設定與文獻檢索策略影響，可能導致特定主題被高估或低估。因此，後續研究應審慎檢視檢索策略對資料集組成的影響，並可輔以質性研究方法進行驗證與補充以強化研究。

參考文獻

英文文獻

1. Abdulhayoglu, M. A., & Thijs, B. (2018). Use of locality sensitive hashing (LSH) algorithm to match Web of Science and Scopus. *Scientometrics*, 116, 1229-1245.
2. Adriaanse, L. S., & Rensleigh, C. (2013). Web of Science, Scopus and Google Scholar: A content comprehensiveness comparison. *The Electronic Library*, 31(6), 727-744.
3. Al-Shroofy, M., Zhang, Q., Xu, J., Chen, T., Kaur, A. P., & Cheng, Y. T. (2017). Solvent-free dry powder coating process for low-cost manufacturing of $\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$ cathodes in lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 352, 187-193.
4. Assefa, S. G., & Rorissa, A. (2013). A bibliometric mapping of the structure of STEM education using co-word analysis. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 64(12), 2513-2536.
5. Berger, K., Baumgartner, R. J., Weinzerl, M., Bachler, J., Preston, K., & Schöggl, J. P. (2023). Data requirements and availabilities for a digital battery passport—A value chain actor perspective. *Cleaner Production Letters*, 4, 100032.
6. Callon, M. (1986). Mapping the dynamics of science and technology: Sociology of science in the real world. *Mac Millan*.
7. Chen, H., & Shen, J. (2017). A degradation-based sorting method for lithium-ion battery reuse. *PLoS One*, 12(10), e0185922.
8. Delucchi, M. A., Yang, C., Burke, A. F., Ogden, J. M., Kurani, K., Kessler, J.,

- & Sperling, D. (2014). An assessment of electric vehicles: technology, infrastructure requirements, greenhouse-gas emissions, petroleum use, material use, lifetime cost, consumer acceptance and policy initiatives. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 372(2006), 20120325.
9. Dhameja, S. (2001). *Electric vehicle battery systems*. Elsevier.
 10. Ding, Y., Chowdhury, G. G., & Foo, S. (2001). Bibliometric cartography of information retrieval research by using co-word analysis. *Information Processing & Management*, 37(6), 817-842.
 11. Dominković, D. F., Bačeković, I., Pedersen, A. S., & Krajačić, G. (2018). The future of transportation in sustainable energy systems: Opportunities and barriers in a clean energy transition. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1823-1838.
 12. Elkind, E. N., Heller, P. R., & Lamm, T. (2020). Sustainable Drive Sustainable Supply: Priorities to Improve the Electric Vehicle Battery Supply Chain. *Center for Law, Energy & the Environment (CLEE) UC Berkeley School of Law, Berkeley, CA*.
 13. Elkind, E., Heller, P., & Lamm, T. (2020). Building a sustainable electric vehicle battery supply chain: Frequently asked questions. *Natural Resource Governance Institute and Berkeley Law*.
 14. European Commission(2023). Legislation 130. *Official Journal of the European Union*
 15. Ferreira, D. A., Prados, L. M. Z., Majuste, D., & Mansur, M. B. (2009). Hydrometallurgical separation of aluminium, cobalt, copper and lithium from spent Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 187(1), 238-246.
 16. Gaines, L. (2014). The future of automotive lithium-ion battery recycling:

- Charting a sustainable course. *Sustainable Materials and Technologies*, 1, 2-7.
17. Gaines, L., Dai, Q., Vaughey, J. T., & Gillard, S. (2021). Direct recycling R&D at the ReCell center. *Recycling*, 6(2), 31.
 18. Georgi-Maschler, T., Friedrich, B., Weyhe, R., Heegn, H., & Rutz, M. (2012). Development of a recycling process for Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 207, 173-182.
 19. Guarnieri, M. (2011). When cars went electric, part one [historical]. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 5(1), 61-62.
 20. Harper, G., Sommerville, R., Kendrick, E. et al. Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature* 575, 75–86 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1682-5>
 - Harzing, A. W., & Alakangas, S. (2016). Google Scholar, Scopus and the Web of Science: a longitudinal and cross-disciplinary comparison. *Scientometrics*, 106, 787-804.
 21. He, Q. (1999). Knowledge discovery through co-word analysis.
 22. Horeh, N. B., Mousavi, S. M., & Shojaosadati, S. A. (2016). Bioleaching of valuable metals from spent lithium-ion mobile phone batteries using *Aspergillus niger*. *Journal of Power Sources*, 320, 257-266.
 23. <https://eurlex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/HTML/?uri=OJ:L:2023:130:FULL>
 24. https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-08/DOE%20OP%20Economy%20Wide%20Report_0.pdf
 25. https://www.gov.cn/xinwen/2018-02/26/content_5268875.htm
 26. Huang, M. H., & Chang, C. P. (2015). A comparative study on detecting research fronts in the organic light-emitting diode (OLED) field using bibliographic coupling and co-citation. *Scientometrics*, 102, 2041-2057.

27. Iglesias-Émbil, M., Valero, A., Ortego, A., Villacampa, M., Vilaró, J., & Villalba, G. (2020). Raw material use in a battery electric car—a thermodynamic rarity assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, 158, 104820.
28. International Energy Agency (IEA) Global EV Outlook 2018 (IEA, 2018).
29. International Energy Agency (IEA) Global EV Outlook 2020 (IEA, 2020).
30. International Energy Agency (IEA) Global EV Outlook 2024 (IEA, 2024).
31. Jajuga, K., Sokolowski, A., & Bock, H. H. (2002). *Classification, clustering, and data analysis: Recent advances and applications (studies in classification, data analysis, and knowledge organization)*. New York, NY: Springer.
32. Jarneving, B. (2005). A comparison of two bibliometric methods for mapping of the research front. *Scientometrics*, 65(2), 245-263.
33. Karimi, G. R., Rowson, N. A., & Hewitt, C. J. (2010). Bioleaching of copper via iron oxidation from chalcopyrite at elevated temperatures. *Food and Bioproducts Processing*, 88(1), 21-25.
34. Katwala, A. (2018). The spiralling environmental cost of our lithium battery addiction. *Wired UK*, 5.
35. Kessler, M. M. (1963). Bibliographic coupling between scientific papers. *American Documentation*, 14(1), 10-25. doi: 10.1002/asi.5090140103
36. Kim, H. C., Wallington, T. J., Arsenault, R., Bae, C., Ahn, S., & Lee, J. (2016). Cradle-to-gate emissions from a commercial electric vehicle Li-ion battery: a comparative analysis. *Environmental science & technology*, 50(14), 7715-7722.
37. Kim, T. Y., Gould, T., Bennet, S., Briens, F., Dasgupta, A., Gonzales, P., ... & Lagelee, J. (2021). The role of critical minerals in clean energy

- transitions. *International Energy Agency: Washington, DC, USA*, 70-71.
38. Kirsch, D. A. (2000). The electric vehicle and the burden of history.
 39. Law, J., & Whittaker, J. (1992). Mapping acidification research: A test of the co-word method. *Scientometrics*, 23(3), 417-461.
 40. Law, J., Bauin, S., Courtial, J., & Whittaker, J. (1988). Policy and the mapping of scientific change: A co-word analysis of research into environmental acidification. *Scientometrics*, 14(3-4), 251-264.
 41. Lèbre, É., Stringer, M., Svobodova, K., Owen, J. R., Kemp, D., Côte, C., ... & Valenta, R. K. (2020). The social and environmental complexities of extracting energy transition metals. *Nature communications*, 11(1), 1-8.
 42. Lybbert, M., Ghaemi, Z., Balaji, A. K., & Warren, R. (2021). Integrating life cycle assessment and electrochemical modeling to study the effects of cell design and operating conditions on the environmental impacts of lithium-ion batteries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144, 111004.
 43. Manzetti, S., & Mariasiu, F. (2015). Electric vehicle battery technologies: From present state to future systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 1004-1012.
 44. Marshakova, S. I. (1973). System of document connections based on references. *Scientific and technical information serial of VINITI*, 6(2), 3.
 45. Martín-Martín, A., Orduna-Malea, E., Thelwall, M., & López-Cózar, E. D. (2018). Google Scholar, Web of Science, and Scopus: A systematic comparison of citations in 252 subject categories. *Journal of Informetrics*, 12(4), 1160-1177.
 46. Ministry of Industry and Information Technology (2018). 中國新能源汽車產業發展規劃. 中華人民共和國中央人民政府

47. Mom, G. (2013). *The electric vehicle: Technology and expectations in the automobile age*. JHU Press.
48. Mohammadi, F., & Saif, M. (2023). A comprehensive overview of electric vehicle batteries market. *e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 3, 100127.
49. Mongeon, P., & Paul-Hus, A. (2016). The journal coverage of Web of Science and Scopus: a comparative analysis. *Scientometrics*, 106, 213-228.
50. Niri, A. J., Poelzer, G. A., Zhang, S. E., Rosenkranz, J., Pettersson, M., & Ghorbani, Y. (2024). Sustainability challenges throughout the electric vehicle battery value chain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 191, 114176.
51. Persson, O. (1994). The intellectual base and research fronts of JASIS. *Journal of the American Society for Information Science*, 45(1), 31-38. doi: 10.1002/(SICI)1097 4571(199401)45:1<31::AID-ASI4>3.0.CO;2-G
52. Peters, J. F., Baumann, M., Zimmermann, B., Braun, J., & Weil, M. (2017). The environmental impact of Li-Ion batteries and the role of key parameters—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 491-506.
53. Pollmann, K., Kutschke, S., Matys, S., Raff, J., Hlawacek, G., & Lederer, F. L. (2018). Bio-recycling of metals: Recycling of technical products using biological applications. *Biotechnology Advances*, 36(4), 1048-1062.
54. Porzio, J., & Scown, C. D. (2021). Life-cycle assessment considerations for batteries and battery materials. *Advanced Energy Materials*, 11(33), 2100771.
55. Ritzhaupt, A. D., Stewart, M., Smith, P., & Barron, A. E. (2010). An investigation of distance education in North American research literature using co-word analysis. *International Review of Research in Open and Distributed Learning*, 11(1), 37-60.

56. Salton, G. (1989). Automatic text processing: The transformation, analysis, and retrieval of. *Reading: Addison-Wesley*, 169.
57. Shafique, M., & Luo, X. (2022). Environmental life cycle assessment of battery electric vehicles from the current and future energy mix perspective. *Journal of Environmental Management*, 303, 114050.
58. Sharabchiev, J. (1989). Cluster analysis of bibliographic references as a scientometric method. *Scientometrics*, 15(1-2), 127-137.
59. Shukla, A. K., Venugopalan, S., & Hariprakash, B. (2001). Nickel-based rechargeable batteries. *Journal of Power Sources*, 100(1-2), 125-148.
60. Situ, L. (2009, May). Electric vehicle development: the past, present & future. In *2009 3rd International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA)* (pp. 1-3). IEEE.
61. Small, H. (1973). Co-citation in the scientific literature: A new measure of the relationship between two documents. *Journal of the American Society for Information Science*, 24(4), 265-269.
62. Smith, S. L., Grail, B. M., & Johnson, D. B. (2017). Reductive bioprocessing of cobalt-bearing limonitic laterites. *Minerals Engineering*, 106, 86-90.
63. Tseng, Y. H. (2002). Automatic thesaurus generation for Chinese documents. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 53(13), 1130-1138.
64. Tseng, Y. H. (2010a). Generic title labeling for clustered documents. *Expert Systems With Applications*, 37(3), 2247-2254.
65. Tseng, Y. H., Lin, C. J., & Lin, Y. I. (2007). Text mining techniques for patent analysis. *Information Processing & Management*, 43(5), 1216-1247.
66. Tseng, Y. H., Lin, Y. I., Lee, Y. Y., Hung, W. C., & Lee, C. H. (2009). A comparison of methods for detecting hot topics. *Scientometrics*, 81(1), 73-90.

67. Tuffour, J. P., & Ewing, R. (2024). Can battery electric vehicles meet sustainable energy demands? Systematically reviewing emissions, grid impacts, and coupling to renewable energy. *Energy Research & Social Science*, 114, 103625.
68. U.S. Department of Energy (2023). Investing in American energy. *Office of policy report*(2023)
69. U.S. Department of Energy, (2021, October 30). Alternative fuels data center; emissions from electric vehicles. Retrieved from Energy Efficiency & Renewable Energy: https://afdc.energy.gov/vehicles/electric_emissions.html.
70. U.S. Department of Energy, (2022).
71. Vogt, M., Dér, A., Khalid, U., Cerdas, F., & Herrmann, C. (2022). Model-based planning of technical building services and process chains for battery cell production. *Journal of Cleaner Production*, 370, 133512.
72. Wang, Q., & Waltman, L. (2016). Large-scale analysis of the accuracy of the journal classification systems of Web of Science and Scopus. *Journal of Informetrics*, 10(2), 347-364.
73. Xin, Y., Guo, X., Chen, S., Wang, J., Wu, F., & Xin, B. (2016). Bioleaching of valuable metals Li, Co, Ni and Mn from spent electric vehicle Li-ion batteries for the purpose of recovery. *Journal of Cleaner Production*, 116, 249-258.
74. Yeh, S. C., Hsieh, Y. L., Yu, H. C., & Tseng, Y. H. (2022). The trends and content of research related to the Sustainable Development Goals: a systemic review. *Applied Sciences*, 12(13), 6820.
75. Yong, J. Y., Ramachandaramurthy, V. K., Tan, K. M., & Mithulananthan, N. (2015). A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 365-

385.

76. Young, K., Wang, C., Wang, L. Y., & Strunz, K. (2012). Electric vehicle battery technologies. In *Electric vehicle integration into modern power networks* (pp. 15-56). New York, NY: Springer New York.
77. Yuan, C., Deng, Y., Li, T., & Yang, F. (2017). Manufacturing energy analysis of lithium ion battery pack for electric vehicles. *CIRP Annals*, 66(1), 53-56.
78. Zhu, J., & Liu, W. (2020). A tale of two databases: the use of Web of Science and Scopus in academic papers. *Scientometrics*, 123(1), 321-335.
79. 中國國家科技信息研究所. (2023). 關於發布 2023 年度科技創新重大項目申報指南的通知. 中國國家科技信息研究所.
<https://www.ncsti.gov.cn/kjdt/tzgg/202312/P020231219500650055790.pdf>

中文文獻

1. 邵軒磊 & 曾元顯. (2018). 文字探勘技術輔助主題分析—以 [中國大陸研究]期刊為例. *問題與研究*, 57(1), 29-62.
2. 張嘉彬 (2016)。從研究方法角度探討研究前沿。 *大學圖書館*，20(1)，88-112。 <https://doi.org/10.6146/univj.20-1.05>
3. 曾元顯 & 林瑜一. (2011). 內容探勘技術在教育評鑑研究發展趨勢分析之應用. *教育科學研究期刊*, 56(1), 129-166.
4. 曾元顯. (2011). 文獻內容探勘工具-CATAR-之發展和應用. *圖書館學與資訊科學*, 37(1)31-49.
5. 劉宜君. (2016). 社會企業利用社會媒體之非結構資料初探. *國家與社會*, (18), 1-37.
6. 張淑惠, 孫茂峰, & 吳文祥. (2021). 應用多元尺度法及文字雲於小兒腦性麻痺症狀初探. *長庚護理*, 32(3), 1-13.

附錄

分類	關鍵字
核心主題	"vehicle battery recycling*" "car battery recycling*" "electric-vehicle battery recycling*" "EVB recycling*" "EV battery recycling*" "electric vehicle battery recycling*" "electric car battery recycling*" "lithium-ion battery recycling*" "Lead-Acid Battery recycling*" "Nickel-cadmium Battery recycling*" "Nickel Metal Hydride recycling*" "solid-state battery recycling*" "lithium-sulfur battery recycling*" "lithium iron phosphate (LFP) battery recycling*" "zinc-air battery recycling*" "sodium-ion battery recycling*" "battery waste management*" "spent battery recovery*" "recycling of portable batteries*" "recycling of advanced lithium-ion chemistries*" "organic battery recycling*" "flow battery recycling*"
相關技術	"battery materials recovery*" "critical materials recovery*" "cobalt recovery*" "recycling of rare earth elements*" "recycling of anode materials*" "recycling of cathode materials*" "graphite recovery from batteries*" "recovery of battery-grade lithium*" "metal recovery from spent batteries*" "pyrometallurgical recycling of batteries*" "hydrometallurgical processing of batteries*"

	"mechanical recycling of batteries*" "direct recycling of lithium-ion batteries*" "electrochemical methods for battery recycling*" "innovative recycling technologies for EV batteries*" "remanufacturing of EV batteries*" "urban mining for EV batteries*" "thermal treatment of spent batteries*" "cryogenic recycling of batteries*" "solvent-based recycling of lithium-ion batteries*" "recovery of manganese from batteries*" "recycling of battery electrolyte*" "polymer recycling in battery systems*" "energy-efficient battery recycling*" "AI-driven battery recycling processes*" "digital twin for battery recycling*" "optimization of EV battery disassembly*" "recycling yield improvement for batteries*" "solid-state electrolyte recovery*" "flexible battery recycling*" "nanotechnology in battery recycling*" "machine learning for battery material recovery*" "eco-design for recyclable batteries*"
其他	"second-life battery applications*" "battery recycling supply chain*" "policy frameworks for battery recycling*" "global trends in EV battery recycling*" "EU battery directive recycling*" "battery stewardship programs*" "economic models for battery recycling*" "sustainable battery end-of-life management*" "environmental impact of battery recycling*" "carbon footprint of battery recycling*" "circular economy in EV batteries*" "sustainable materials for EV batteries*" "market trends in battery recycling*" "battery recycling industry analysis*" "global recycling networks for EV batteries*" "localization of battery recycling supply chains*"

	"batteries for renewable energy storage systems*" "life cycle emissions of battery recycling*" "environmental trade-offs in battery recycling*" "regional regulations on EV battery recycling*" "producer responsibility in battery recycling*" "cross-border challenges in battery recycling*" "high-capacity battery recycling challenges*" "future trends in EV battery recycling*"
透過布林運 算將關鍵字 串聯	"vehicle battery recycling*" or "car battery recycling*" or "electric-vehicle battery recycling*" or "EV battery recycling*" or "EV battery recycling*" or "electric vehicle battery recycling*" or "electric car battery recycling*" or "lithium-ion battery recycling*" or "battery materials recovery*" or "Lead-Acid Battery recycling*" or "Nickel-cadmium Battery recycling*" or "Nickel Metal Hydride recycling*" or "critical materials recovery*" or "cobalt recovery*" or "recycling of rare earth elements*" or "recycling of anode materials*" or "recycling of cathode materials*" or "graphite recovery from batteries*" or "recovery of battery-grade lithium*" or "metal recovery from spent batteries*" or "pyrometallurgical recycling of batteries*" or "hydrometallurgical processing of batteries*" or "mechanical recycling of batteries*" or "direct recycling of lithium-ion batteries*" or "solid-state battery recycling*" or "second-life battery applications*" or "electrochemical methods for battery recycling*" or "innovative recycling technologies for EV batteries*" or "battery recycling supply chain*" or "policy frameworks for battery recycling*" or "global trends in EV battery recycling*" or "EU battery directive recycling*" or "battery stewardship programs*" or "economic models for battery recycling*" or "sustainable battery end-of-life management*" or "environmental impact of battery recycling*" or "carbon footprint of battery recycling*" or "circular economy in EV batteries*" or "sustainable materials for EV batteries*" or "solid-state battery end-of-life recycling*" or "lithium-sulfur battery recycling*" or "lithium iron phosphate (LFP) battery recycling*" or "zinc-air battery recycling*" or "remufacturing of EV batteries*" or "battery waste management*" or "spent battery recovery*" or

	<p>"recycling of portable batteries*" or "urban mining for EV batteries*" or "thermal treatment of spent batteries*" or "cryogenic recycling of batteries*" or "solvent-based recycling of lithium-ion batteries*" or "recovery of manganese from batteries*" or "recycling of battery electrolyte*" or "sodium-ion battery recycling*" or "polymer recycling in battery systems*" or "energy-efficient battery recycling*" or "cost optimization in battery recycling*" or "AI-driven battery recycling processes*" or "digital twin for battery recycling*" or "optimization of EV battery disassembly*" or "recycling yield improvement for batteries*" or "market trends in battery recycling*" or "battery recycling industry analysis*" or "global recycling networks for EV batteries*" or "localization of battery recycling supply chains*" or "batteries for renewable energy storage systems*" or "life cycle emissions of battery recycling*" or "environmental trade-offs in battery recycling*" or "regional regulations on EV battery recycling*" or "producer responsibility in battery recycling*" or "cross-border challenges in battery recycling*" or "solid-state electrolyte recovery*" or "flexible battery recycling*" or "recycling of advanced lithium-ion chemistries*" or "organic battery recycling*" or "flow battery recycling*" or "nanotechnology in battery recycling*" or "machine learning for battery material recovery*" or "eco-design for recyclable batteries*" or "high-capacity battery recycling challenges*" or "future trends in EV battery recycling*"</p>
--	---