

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 Bioresources and Agriculture

National Taiwan University

Master's Thesis

現行國際生物炭碳信用獲取技術與方法學於臺灣之適

用性評估研究

Study of Assessing the Applicability of Current
International Biochar Carbon Credit Acquisition
Technologies and Methodologies in Taiwan

張雅婷

Ya-Ting Chang

指導教授：張庭維 博士

Advisor: Ting-Wei Chang, Ph.D.

中華民國 114 年 7 月

July 2025

致謝

白駒穿越長達三年的鴻溝，夢回 2022 年秋，從豐田大郡頂樓看著車水馬龍，心裡想：「即便在這地面增添鮮紅也只會造成更多麻煩」。那天後彷彿是按到退出遊戲般，再次讀取名為 2025 年夏的遊戲進度，畫面已經是播放製作人員名單的時刻。

通過學位考試是最終的主線任務，獲得此成就並非我這位吟遊詩人能獨力完成。這趟旅途中，衷心感謝指導教授張庭維老師，在公務繁忙與籌建新實驗室之際，仍每天抽空與我討論論文，並時常陪我修改至深夜。老師曾說「文字有魔法」，在撰寫論文過程中我深切體會到這點，原本不甚精準的論述，和老師討論後變得淺顯易懂且更具學術性。老師在生物炭研究上的造詣極為深厚，不僅熟悉國內外最新學術進展，更能將複雜的科學概念轉化為清晰的實務策略。若向他人介紹，我會說我的老師是一位能將理論與應用緊密結合、引領學生全面成長的良師。感謝老師傾囊相授專業知識，使我順利完成學業並取得碩士學位。

離開新手村踏上旅途的過程中，一路遇見許多給予我幫助的老師。感謝曲芳華老師教會我在學術研究中恪守誠實的倫理原則。感謝邱祈榮老師引領我進入 ESG 專業領域，啟發我對論文題目與研究方向的思考。感謝鄭智馨老師提醒我應在論文中引用更多相關文獻加強研究背景。感謝官崇煜老師提供我論文所需的 LCA 建模程式與資料庫。感謝楊啟見老師對論文內容的肯定與地理位置的建議。感謝林敏宜老師自大學時期便關心照顧我，至碩士期間依然為我費心，若沒有您的協助與鼓勵，我不會有今日的成就。感謝劉哲良老師在《碳定價：理論與實務應用》課程中的教學，為我奠定專業知識的基礎。感謝蔡明哲老師讓我修習材料組必修課程，使我順利補足學分。感謝謝旭亮老師，在我於植科所實習期間的照顧與專業指導。感謝詹琇琴女士，在學業之外亦教導我為人處世之道。

和我一同走到最後的夥伴們，能與你們分享這份成就是我的榮幸。感謝皮桑的魔法小卡，為我在台北的生活增添滋潤，並在每天接住我 800 種情緒時，展現出連陪伴型 AI 都無法取代的溫暖。小太陽徐一方，自大學相識至今，若當初你沒有從嘉大轉來陪我讀碩，我可能早已每週奔向心理諮詢所。同期戰友玉馨，感謝你一路的加油打氣，將我的好運分你，祝你口試順利。士甫學長與莉茹學姊，以過來人的經驗鼓勵我，讓我一步步走著你們曾走過的路，從不感到孤單。佩欣與秀如，你們默默的支持，是我能撐下去的原因之一。

最終感謝我的家人，若我有任何成就，都歸功於你們的栽培。特別向最敬愛的爸爸說聲辛苦了，能成為您的女兒是我此生最大的幸福，願您在另一個世界一切安好。

中文摘要

為實現 2050 年淨零排放目標，生物炭作為負碳技術之一，具有固碳減排、增強土壤碳匯，並可參與國際碳交易市場之經濟價值。本研究選用兩項國際現行方法學《VM0044 生物炭於土壤與非土壤應用之使用方法學》(VM0044: Biochar utilization in soil and non-soil applications) 與《Puro.earth 生物炭方法學》(Puro.earth Biochar Methodology)作為實驗方法架構，將其應用於臺灣農業廢棄物資源情境中，估算可達成的碳移除量與潛在經濟收益，以此來初步評估農業廢棄物生物炭碳信用獲取在臺灣之適用性。根據行政院農業部 113 年度農業廢棄物統計資料，稻殼與稻蒿約占臺灣農業廢棄物總量的 77% (約 185 萬噸)，顯示其具有高度資源化潛力。本研究假設以熱裂解技術將其轉化為生物炭，為評估臺灣農業廢棄物熱裂解轉化為生物炭之產量，根據不同方法學所規範之農業廢棄物最高可使用上限量，推估每年可利用稻殼稻蒿量約為 84-117 萬公噸。考量熱裂解設備每年處理數量上限，依各區稻殼與稻蒿產量比例，，本研究將全臺劃分為北、中、南、東四區，按比例配置熱裂解處理數量。將以上情境與參數進一步代入兩種國際方法學進行民國 113 年度潛在的稻殼、稻蒿生物炭生產量以及碳信用之推估。

根據模擬結果，VM0044 專案於 2025 年可生產約 28 萬噸生物炭，每公噸的生物炭能夠移除 1.26 噸 CO₂，而 Puro.earth 專案可生產 37 萬噸生物炭，每公噸生物炭則能移除 0.88 噸 CO₂。根據生物炭碳交易市場價格之估計（每移除 1 tCO_{2e}），若依 VM0044 於 2025 年成功取得並售出約 23.8 萬至 35.5 萬個 VCUs，預期可產生約 4,227 萬至 6,287 萬美元 (約新台幣 12 億至 18 億元) 之收益；若依 Puro.earth Biochar Methodology 取得約 32.8 萬個 CORCs，潛在收入則可達約 5819 萬美元 (約新台幣 17 億元)。可見全台稻殼與稻蒿生物炭得出的碳信用具備可觀的經濟產值。但上述估算結果尚未扣除成本、手續費、風險準備金與其他交易支出，實際價格仍須視專案品質、匯率與市場行情而定。

生物炭生產雖具減碳與經濟潛力，仍涉及設置成本、能源消耗與污染風險，如重金屬與有機物逸散。目前本研究未進行相關評估，若欲推動碳信用專案，應納入完整成本結構與敏感度及不確定性分析，以確保其可行性與永續性。本研究結合臺

灣農業廢棄物情境進行初步推估與方法學模擬，顯示生物炭具備應用與碳收益潛力，並具有碳封存與市場交易的實務參考價值，未來仍需更多在地實證驗證其成效。

【關鍵字】生物炭、淨零排放、碳封存、碳移除、碳交易、負碳技術、農業廢棄物

Abstract

To achieve the goal of net-zero emissions by 2050, biochar, which is recognized as a negative emission technology, offers the potential for carbon sequestration, greenhouse gas reduction, and soil carbon enhancement. Meanwhile, the carbon sequestered by biochar can possess economic value through participation in international carbon markets. To achieve a preliminary assessment of the applicability of carbon credit acquisition from agricultural-waste-based biochar in Taiwan, this study estimated the potential carbon removal and economic benefits of biochar derived from agricultural waste in Taiwan. Two internationally recognized methodologies were adopted in this study, which are "VM0044: Biochar Utilization in Soil and Non-Soil Applications" and the "Puro.earth Biochar Methodology", as the analytical frameworks.

According to the statistics from the Ministry of Agriculture in 2024, rice husks and rice straw constitute approximately 77% of the total agricultural waste in Taiwan, equivalent to around 1.85 million metric tons. This indicates a substantial potential of agricultural waste for resource valorization such as production of biochar. In the calculation, this study premises an application of pyrolysis technology to convert these feedstocks into biochar. Based on the maximum allowable usage limits stipulated by each methodology, there were 0.84 to 1.17 million metric tons of rice husks and straw can be utilized annually in 2024. Considering the processing capacity of pyrolysis systems and the regional distribution of feedstock supply, the study divides Taiwan into four zones (north, central, south, and east) and allocates feedstock accordingly. These data and assumptions are subsequently input into both international methodologies for carbon credit estimation.

Simulation results indicate that, under the VM0044 methodology, approximately 280,000 metric tons of biochar could be produced in 2025, with each ton capable of removing 1.26 tons of CO₂. In contrast, the Puro.earth methodology allows for the production of 370,000 metric tons of biochar, with each ton removing approximately 0.88 tons of CO₂. Based on estimated market prices for biochar carbon credits (per tCO_{2e} removed), if the VM0044 project successfully issues and sells between 238,858.23 and 355,219.98 Verified Carbon Units (VCUs) in 2025, it may yield revenue between USD 42.27 million and USD 62.87 million (approximately NTD 1.2 to 1.8 billion). Under the

Puro.earth methodology, approximately 328,768.02 CO₂ Removal Certificates (CORCs) could be generated, with a potential income of USD 58.19 million (around NTD 1.7 billion). This implies that the carbon credit derived from rice-waste biochar can provide a substantial economic output. However, these estimates exclude project costs, transaction fees, buffer reserves, and other expenses. Thus, the actual revenue will depend on project quality, exchange rates, and prevailing market conditions.

Despite its carbon reduction and economic potential, biochar production involves capital investment, energy consumption, and environmental risks such as the release of heavy metals and organic pollutants. These factors are not included in the current analysis. For any future development of carbon credit projects, comprehensive cost structures, sensitivity analyses, and uncertainty assessments must be incorporated to ensure feasibility and sustainability. This study presents a preliminary estimation and methodological simulation contextualized for Taiwan's agricultural waste scenario, demonstrating that biochar holds considerable potential for carbon sequestration and market-based applications. Nevertheless, further local empirical validation is necessary to confirm its practical effectiveness.

【Keywords】 biochar, net-zero emissions, carbon sequestration, carbon removal, carbon emission trading, negative emissions technologies, agricultural waste

目次

| | |
|-------------------------|------|
| 致謝..... | i |
| 中文摘要..... | ii |
| Abstract | iv |
| 目次..... | vi |
| 圖次..... | viii |
| 表次..... | ix |
| 第一章 緒論 | 1 |
| 第一節 研究動機與目的 | 1 |
| 第二節 研究流程與架構 | 3 |
| 第二章 文獻回顧..... | 5 |
| 第一節 生物炭..... | 5 |
| 第二節 碳交易 | 13 |
| 第三節 國際碳認證機構與生物炭方法學..... | 17 |
| 第四節 LCA..... | 20 |
| 第五節 方法學案例 | 23 |
| 第三章 研究材料與方法 | 29 |
| 第一節 生物質廢棄物來源..... | 29 |
| 第二節 情境假設 | 30 |
| 第三節 溫室氣體移除公式..... | 32 |
| 第四章 研究結果與討論 | 53 |
| 第一節 碳匯計算 | 53 |

| | | |
|------------|---------------|----|
| 第二節 | 適用性條件分析 | 65 |
| 第五章 | 結論 | 72 |
| 參考文獻 | 73 | |
| 附錄一 | 82 | |

圖次

| | |
|---|----|
| 圖 1 研究流程 | 4 |
| 圖 2 2025 年 7 月碳權專案依登錄機構類別的分布情形 | 18 |
| 圖 3 VCS 專案成果統計 | 18 |
| 圖 4 生命週期評估之四個階段（資料來源：ISO 14040:2006） | 21 |
| 圖 5 鋼盾土坑示意圖（Verra, 2023） | 25 |
| 圖 6 案例專案邊界（Verra, 2023） | 26 |
| 圖 7 113 年稻殼、稻蒿處理方式及妥善處理量 | 29 |
| 圖 8 PX 500 概念圖 | 30 |
| 圖 9 專案邊界範疇 | 33 |
| 圖 10 生物炭活動 LCA 的整體系統邊界（Puro.earth V3, 2022） | 46 |
| 圖 11 生物炭活動 LCA 的整體系統邊界（Puro.earth V3, 2022） | 47 |
| 圖 12 本研究設定之系統邊界 | 52 |
| 圖 13 2024 年臺灣農業廢棄物排放 | 56 |
| 圖 14 臺灣土壤酸鹼值（農業部農試所, 2015）。 | 67 |

表次

| | |
|---|----|
| 表 1 可用於生物炭製備的合格原料清單 (VCS, 2025)。 | 6 |
| 表 2 農業廢棄物排放量 (單位：公噸/年) | 10 |
| 表 3 專案預估溫室氣體減量或移除量 | 24 |
| 表 4 每個設備之估計生物炭產量..... | 26 |
| 表 5 不同苗木種類之碳含量 | 27 |
| 表 6 113 年農產廢棄物總量及比例 | 29 |
| 表 7 PX 500 規格 | 30 |
| 表 8 各項排放係數數值 | 32 |
| 表 9 各種原料與生產方式下的生物炭有機碳含量因子值 | 36 |
| 表 10 生物炭中有機碳含量因子經過 100 年後仍留存於土壤中的比例值 | 36 |
| 表 11 CDM TOOL 12 預設車輛排放因子 | 41 |
| 表 12 在不同土壤溫度 T_s 下 100 年時間範圍 TH 估計生物炭穩定性的迴歸係數。 可以使用 CO2 移除供應商提供的 Puro 工具進行精確的溫度選擇。 | 49 |
| 表 13 113 年臺灣各地區稻穀年產量 (單位：公噸/年) | 54 |
| 表 14 低技術熱裂解獲得之產物比率 | 54 |
| 表 15 113 年臺灣各地區稻殼稻蒿利用上限比率 (單位：公噸/年) | 54 |
| 表 16 稻殼稻蒿轉化為生物炭之乾重 (單位：公噸) | 58 |
| 表 17 運輸活動碳排放表 | 59 |
| 表 18 VCUs 價格估算 | 60 |
| 表 19 113 年臺灣各地區稻殼稻蒿利用上限比率 (單位：公噸/年) | 62 |
| 表 20 稻殼稻蒿轉化為生物炭之乾重 (單位：公噸) | 62 |
| 表 21 各地土壤溫度 | 62 |

| | |
|---|----|
| 表 22 100 年尺度下生物炭能封存的 CO ₂ 量 | 62 |
| 表 23 生命週期碳排放量 | 63 |
| 表 24 CORCs 價格估算 | 63 |
| 表 25 生物炭產品中重金屬容許標準 | 69 |
| 表 26 生物炭產品中有機污染物容許標準 | 69 |
| 表 27 地下水污染物之重金屬與有機化合物（單位：mg L ⁻¹ ） | 70 |
| 表 28 土壤污染物之重金屬與有機化合物（單位：mg kg ⁻¹ soil） | 70 |
| 表 29 技術範疇 | 82 |
| 表 30 合格的原料與生產 | 82 |
| 表 31 原料永續性標準 | 83 |
| 表 32 持續合格的原料與生產條件 | 83 |
| 表 33 合格生物炭於土壤/非土壤應用條件 | 84 |

第一章 緒論

第一節 研究動機與目的

在全球氣候變遷的威脅下，實現淨零排放已成為各國的共同目標。臺灣於 2022 年 3 月 30 日宣佈「2050 年達成淨零排放」目標，提出四大轉型策略，包括「能源轉型」、「產業轉型」、「生活轉型」、「社會轉型」，並建構「科技研發」、「氣候法制」兩大基礎，輔以「十二項關鍵戰略」開展行動計畫（國家發展委員會，2022）。而在十二項關鍵戰略中，自然碳匯是減緩氣候變遷的重要手段之一，雖然自然碳匯是重要的碳移除方式，但人為活動（如森林砍伐、土地開發和污染）正在削弱其功能。為了強化自然碳匯的功能並確保其永續性，可以透過「以自然為本的解決方案」（Nature-based Solutions, NbS）來保護和增強生態系統。例如，恢復森林、重建濕地、改良農業土壤管理及應用生物炭等措施（Metz et al., 2007），都能提升生態系統的碳封存能力。

根據《巴黎協定》，各締約方需努力將全球升溫限制於工業化前水準 1.5°C 以內，而達成此目標必須實現淨零排放。然而政府間氣候變化專門委員會（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）報告顯示僅靠減少排放難以達成 1.5°C 目標，這是因為部分產業的排放難以完全消除（IPCC, 2022），必須透過負碳技術（Negative Emission Technologies, NETs）從大氣中移除二氧化碳（carbon dioxide, CO₂），才能彌補減量措施的不足，以確保實現《巴黎協定》的長期溫度目標。面對淨零轉型的挑戰，各國政府不僅需強化溫室氣體（Greenhouse gas, GHG）盤查制度與減碳工具的多元布局，企業亦日益面臨碳中和承諾與永續揭露的壓力。為此，國際間積極發展高品質的碳信用交易機制，希望透過市場化手段驅動 NETs 的規模化應用，並為淨零目標的實現提供制度性支撐。

NETs 下可分多種技術，如直接空氣捕獲（Direct air capture, DAC）、生質能與碳捕集和封存（Bioenergy with carbon capture and storage, BECCS）、生物炭（Biochar）等。而以 NbS 角度來看，生物炭不僅具備碳移除功能，還能結合農業、林業等之經營，達到提升生產力與環境永續的雙重效益。

臺灣作為農業資源豐富的地區，具備推廣生物炭技術的優越條件。農業廢棄物可作為生物炭的原料(EBC, 2023)。本研究在選擇原料時，稻殼與稻蒿因產量穩定、取得容易且集中度高，具備良好的再利用潛力。在臺灣及多數亞洲農業國家，水稻是主要作物，每年收穫後產生大量剩餘資材，若無妥善去化，最常見的途徑便是露天焚燒及就地掩埋。過去文獻指出，這種焚燒行為已成為亞洲農村細懸浮微粒(PM2.5)、黑碳、CO₂排放的主要來源之一(Oraby et al., 2025)。若能將稻殼與稻蒿作為生物炭原料，將有助於同時解決農業廢棄物處理與溫室氣體排放的雙重問題。同時，碳交易市場的建立可為生物炭應用提供經濟誘因。目前臺灣碳交易市場尚未成熟，但國際自願性碳市場(Voluntary Carbon Market, VCM)已將生物炭納入碳信用專案，未來臺灣若發展相關機制，將有助於推動生物炭技術應用。

目前國際間盛行之生物炭碳信用認定方法學為《VM0044 生物炭於土壤與非土壤應用之使用方法學》(VM0044: Biochar utilization in soil and non-soil applications) (於後略稱 VM0044) 與《Puro.earth 生物炭方法學》(Puro.earth Biochar Methodology)。根據以上方法學，生物炭的減碳效益高度依賴地區性條件，包括土壤特性、氣候；甚至當地經濟結構、農業經營模式、農作物種類、交通運輸等，皆會影響到生物炭的生產規模以及額外溫室氣體之排放量。儘管國際間已有零星農業生物質生物炭碳信用轉換之案例，但臺灣與其他區域之特性差異可能會影響生物炭的施用作業流程與減碳效益，致使農業生物質生物炭之碳信用轉換對於臺灣是否具備實用效益尚有可議之處。而評估生物炭之實用減碳效益，必須要了解臺灣基於農業生物質廢棄物的生物炭生產量，以及其製造、施用時造成的額外碳排。本研究欲透過將應用 VM0044 (Version 1.2) 與 Puro.earth Biochar Methodology (2022 V3) 的核心設計、實施細節及減排效益於臺灣的農業情境來闡明臺灣潛在的農業生物質生物炭之碳信用轉換量。臺灣之農業生產以稻米為大宗，而農業生物質廢棄物以稻殼(rice husk)以及稻蒿(rice straw)為主(農業部, 2024)。因此，本研究將以稻殼與稻蒿為對象，計算其潛在的生物炭生產量以及碳信用轉換量。透過此研究，不僅能對於如何發展符合臺灣需求的生物炭碳交易市場制度提供具體建議，亦能為推動國際碳交易市場中的生物炭應用作出初步的貢獻，進而促進臺灣碳交易市場與減碳之長遠發展。

第二節 研究流程與架構

本研究之研究流程如圖 1 所示。由對過去文獻進行回顧，了解生物炭以及臺灣目前生物炭之製造、應用情形，再依國際之減碳需求，本研究之研究目的其設定的主要問題如下：臺灣的稻殼、稻蒿資源是否能夠依循 VM0044 與 Puro.earth Biochar Methodology 的標準，成功取得足量的國際碳信用？為回答以上問題，實驗架構會首先以文獻收集為基礎，廣泛蒐集生物炭製備與產品參數，VM0044 和 Puro.earth 的官方文件，以及過去進行生物炭碳移除實務之國際案例。透過了解兩大方法學在碳封存之計算邏輯、監測報告、原料適用性等方面的規範，同時也深入盤點臺灣現有的農業廢棄物產出現況，特別是稻殼、稻蒿的產量，為後續模擬計算鋪墊參數資料。

接續前述分析，本研究基於台灣地理，考量合理之生物炭製造情境，包含生產設備流程與運輸等，設定生物炭產品的原料集散、燒製、包裝、產品集散過程。再將收集到之農業廢棄物產量、生物炭製造參數、生物炭成品特性參數依照 VM0044 與 Puro.earth Biochar Methodology 說明，逐條計算以得合理之生物炭生產量、碳移除量、碳信用經濟規模之估計。

在量化碳信用收益後，進一步討論未來農業廢棄物生物炭在其他層面上可能會面臨到的問題範疇，為相關農業廢棄物生物炭於臺灣應用之適合性指出未來仍須闡明的議題。

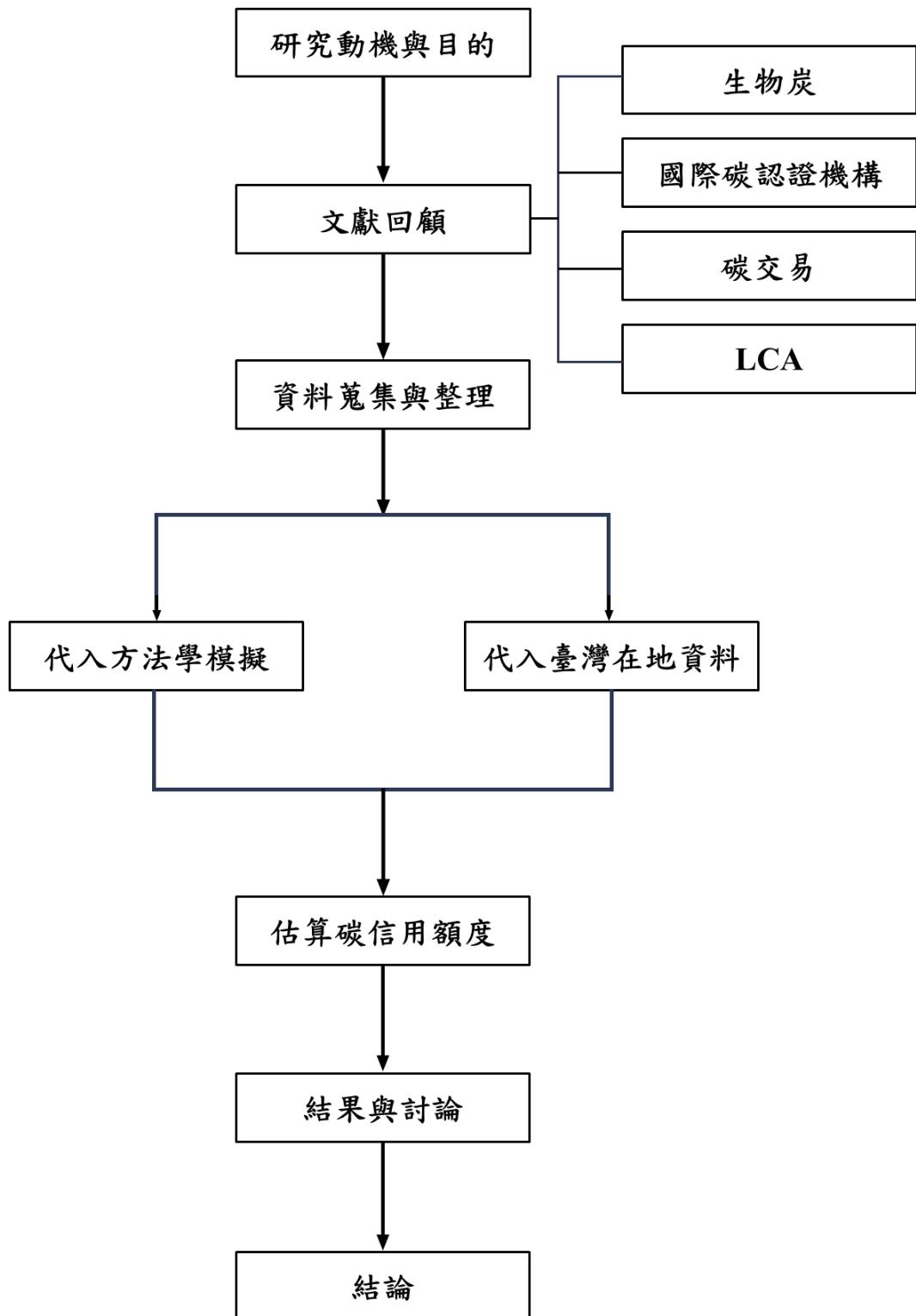


圖 1 研究流程

第二章 文獻回顧

第一節 生物炭

生物炭作為一種兼具環境與經濟效益的材料，近年來在全球氣候變遷與永續發展議題中受到高度關注。其不僅能有效提升土壤品質、促進農業生產，更因具備碳封存與減緩溫室氣體排放的潛力（Zhang et al., 2019），被納入多項國際科學與政策討論，是 NETs 領域中兼具科學基礎與實務可行性的代表之一。本章節將從生物炭的定義切入，進一步探討其在現代科學中的價值、製備技術、潛在風險。

(一) 定義

生物炭是指以生物質（biomass）為原料，在高溫缺氧或低氧條件下經熱裂解（pyrolysis）產生富含碳的固體產物，並含有少量礦物質及微量元素（Lehmann and Joseph, 2009；Tomczyk et al., 2020）。其外觀多為黑色或深灰色的多孔碳塊，由於經高溫熱裂解移除了大部分揮發性有機化合物（Volatile organic compound, VOC），保留了穩定的結構，因此具有孔隙度高、表面積大、穩定性佳等特徵（EBC, 2023）。這些特性使生物炭在農業土壤改良、溫室氣體減排及廢棄資源循環利用等領域展現廣泛的應用（Wang & Wang, 2019）。

生物炭的原料多樣，但生物炭碳轉換方法學中也可能規定合格之原料種類與途徑，如 VM0044 中有詳細的原料標準（表 1）。在選擇製造生物炭的原料時，雖然任何有機物皆可作為製造來源，但若從永續環境的角度思考，應優先使用在地農業生產所產生的剩餘資源。這不僅能使資源再利用，更能避免與其他土地利用產業（如糧食生產或原料種植）產生競爭，進而兼顧環境與經濟的雙重效益（臺灣農業科技資源運籌管理學會，2017）。一般常見的生物質原料包括農業及林業廢棄物，如稻殼、玉米桿、麥秸、木屑、果殼、甘蔗渣以及樹葉等；也可使用畜禽糞便、污泥，或經前期脫水與預處理後的都市有機廢棄物。這些生物質若直接焚燒，除了可能引發空氣汙染，也會迅速將其中的碳含量轉化為 CO₂ 排放到大氣中。若將其轉化為生物炭，就能將一部分的碳永久封存，同時獲得具備吸附能力與改良土壤之效的材料（Gul et al., 2015）。

表 1 可用於生物炭製備的合格原料清單 (VCS, 2025)。

| 原料來源類別 | 永續標準 | 生物質廢棄物範例 (非完整列舉) |
|-----------|--|--|
| 農業生物質廢棄物 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 若直接使用來自田地的農業生物質廢棄物，需提供證據證明該活動不會導致土壤碳儲量減少或農作物生產力降低。 2. 在沒有文件證明的情況下，為防止土壤退化，原料移除量不得超過殘餘物總量的 50% (Andrew, 2006 ; Battaglia et al., 2020)。 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 樹木、藤蔓及灌木修剪廢棄物。 2. 收穫殘餘物，如稻蒿、葉片、莖稈、殼、果渣、果仁等。 3. 水果及蔬菜殘餘物。 |
| 食品加工殘餘物 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 殘餘物必須來自食品加工設備。 2. 該設備不得為了生產生物炭而刻意提高每單位產出所產生的殘餘物。 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 清洗、去皮、離心與分離等流程所產生的原料。 2. 過期食品殘渣。 3. 食品業加工過程的殘餘物 (例如咖啡、茶、可可或菸草等)。 |
| 林業和其他加工木材 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 來自森林的木質原料 (而非製材廠加工的副產品) 必須證明其來源符合永續原則，且不會導致森林砍伐或退化。可作為永續利用證明的範例包括：經相關州或區域主管機關核准的永續經營計畫、林業認證如森林驗證認可計畫 (Programme for the Endorsement of Forest Certification, PEFC) 、森林管理委員會 (Forest Stewardship Council, | <ol style="list-style-type: none"> 1. 森林經營或伐採產業產生的邊材、鋸屑及其他副產品。 2. 森林相關產業的任何副產品，例如木棧板與木材廢料。 3. 因森林野火燃料減量，或經州、省、聯邦主管機關指定為過度繁茂區域而進行疏伐所產生之木材。 4. 對木本植被進行修剪或疏伐 (不含可銷售木材) 所產生的材料，例如行道樹、果園、防風林、河岸緩衝帶、混農林經營地，或牧場入侵種移除。 |

| | | |
|--------|---|--|
| | FSC) 或符合清潔發展機制 (Clean Development Mechanism, CDM) 《CDM EB23, Annex 18》對再生生物質的要求。 | 5. 林分經營或造林過程中砍除的病害木。 6. 經過燃燒的木質生物質。 7. 廢紙與紙板。 |
| | 2. 基於健康與安全考量，處理後之木材作為施用於土壤的原料時，不得含有任何油漆殘留、溶劑或其他污染物，包括任何可能具毒性的雜質（歐洲生物炭驗證 European Biochar Certificate, EBC, 2022 ; Hedley et al. 2020。）。 | 1. 原料需符合重金屬及其他污染物的相關標準值，並以國際生物炭倡議組織 (International Biochar Initiative, IBI) 當前版本的《IBI Biochar Testing Guidelines》或《EBC Production Guidelines》為基準。該生物質應屬於工業或都市廢棄物中的「非化石成分」，並符合《CDM EB23, Annex 18》的再生生物質定義。 |
| 循環經濟 | 1. 原料必須是養殖產業過程所產生的副產品。 2. 專案開發者須證明，像布袋蓮 (<i>Eichhornia</i> | 1. 城鄉綠化修剪枝、無毒之都市綠色廢棄物。 2. 廢水處理產生的生物固體 (Biosolids)。 3. 造紙廠污泥。 |
| 水產養殖植物 | | 1. 海藻、藻類剩餘資材、水生入侵物種(僅限植物界)。 |

| | |
|--|---|
| | <i>crassipes</i>) 等具入侵性的水生植物，並非為了取得原料而被故意引入或放養。 |
| 畜禽糞便 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 廢棄物必須是畜牧業的副產品。 1. HCFA 不得超過生質能設備年度生物質廢棄物處理量的 5%。 2. 專案開發者須提供相關資料，以證明已於生物質廢棄物流完全燃燒前，採用合格技術 (affirmative technology) 提取生物炭。 3. 專案開發者還需證明，生質能設備在原料轉移至生物炭專案時，沒有使用化石燃料來補償熱值損失。 4. 最終生產的材料需符合《IBI Biochar Testing Guidelines》。 |
| 高碳飛灰 (High-carbon fly ash, HCFA) | <ol style="list-style-type: none"> 1. 自豬、牛、馬及家禽農場的廢棄物。 1. 汽電共生設備之副產品。 |

資料來源：VCS Methodology VM0044 V1 .2

(二) 裝備技術

生物炭的裝備技術主要以熱裂解為核心，將生物質於缺氧或低氧環境中加熱分解為固態炭、液體油與氣體 (Weber & Quicker, 2018)，其中熱裂解依加熱速率與反應時間區分為快、中、慢等型態，而氣化 (Gasification)、水熱碳化 (Hydrothermal Carbonization, HTC) 及焙燒 (Torrefaction) 則因原理與產物分佈率截然不同，被視為與熱裂解明顯區分的其他生質能熱轉換技術。生物炭裝備技術的選擇取決於生物質原料的特性和最終用途。

VM0044 將水熱碳化及焙燒排除，主要原因在於這兩種技術所產生的固體產物

無法被科學證明在土壤或非土壤應用下具備超過 100 年以上的穩定性，亦即不符合長期碳封存的要求。

1. 热裂解

热裂解生成之生物炭特性高度依賴原料組成與热裂解條件，包括反應溫度、保溫時間、是否進行活化處理或表面改質等因素(Cha et al., 2016; Wang & Wang, 2019)。其中，热裂解溫度為影響碳化過程之關鍵參數，決定生物炭的產率、能值、碳穩定性、孔隙結構以及其酸鹼特性 (He et al., 2021)。

(1) 快速热裂解：在極高加熱速率、中高溫（約 400–600°C）以及極短反應時間下，於嚴密控制氧氣的條件中進行的技術 (Anando et al., 2023; Shen & Wu, 2023)。這種技術以生產生物油 (Bio-oil) 為主要目標，生物炭則是副產物，產率約在 12 至 25%左右。由於反應迅速且停留時間極短，所形成的生物炭通常碳化程度較低，含有較多揮發分和豐富的表面官能基，呈現較高的化學活性，但其碳穩定性較慢速熱裂解所得生物炭低 (Zhang et al., 2021)。快速热裂解適合大規模、連續式生產，其技術效率高，但如果以生物炭作為主要目標產物時則並非首選。

(2) 中速热裂解：在加熱速率、反應溫度及停留時間上均介於快速热裂解與慢速热裂解之間，各產物的產率也較為均衡。生物炭的碳化程度和穩定性介於快、慢速热裂解之間，適合用於土壤改良、吸附材料或能源等不同應用 (Kazawadi et al., 2021)。

(3) 慢速热裂解：通常在氧氣受限的條件下，以 5-10°C/min 的緩慢升溫速率進行，因其具備技術成熟、操作簡便與成本效益高等優勢，已成為目前生物炭生產中應用最廣泛的熱化學轉化途徑 (Tripathi & Sahu, 2016)。

2. 氣化

氣化是一種將生物質轉化為更高價值能源形式的熱化學轉化技術，固體生物炭的產率較低 (Wang & Wang, 2019)，其核心在於需要高溫、局部供氧，以及目標產物以氣體為主、生物炭為輔。該過程通常在高溫條件下（超過 700 °C）進行，並需加入氣化劑如空氣、氧氣或水蒸氣，以促使原料分解產生熱解氣體 (pyrolytic gas) 與生物炭。氣體的主要成分為一氧化碳 (CO)、氫氣 (H₂)、CO₂ 與 CH₄，其中的合成氣 (syngas) 亦可進一步用於發電或化工品合成，例如碳氫化合物與醇類 (Bridgwater, 2012；Sun et al., 2025)。在產物特性上，氣化生物炭具有多孔性及其

碳結構中含有大量芳香環（aromatic rings）(Xiao & Chen, 2017)。這種結構形成生物炭高度的化學穩定性和耐久性，使其在環境中不易被微生物或化學作用分解，能夠長時間封存碳元素。氣化的應用潛力不僅止於能源轉換。所產生的 syngas 與 bio-oil 可用於發電、供熱，或作為替代燃料，並提升整體系統的碳封存潛力。

(三) 不同原料對生物炭特性的影響

不同原料對生物炭的特性有顯著影響，碳氮比高的原料通常生產出碳穩定性高的生物炭，但營養含量可能較低；木質素、纖維素和半纖維素的比例也決定了生物炭的孔隙結構程度；無機鹽含量較高的原料會提升生物炭的肥料效用，但需警惕可能存在的重金屬污染。

實際應用中，農業廢棄物如稻殼具高矽成分，有助保水(Hamidu et al., 2025)；木質材料產生高穩定性炭，適用於吸附與碳封存(Hassan et al., 2020)。畜禽糞便炭含養分高，但重金屬風險需控管(Tan et al., 2023)。食品副產物如咖啡渣孔隙豐富、碳結構穩定，具良好吸附潛力。其餘如園林廢棄物、水生植物與工業副產物則視用途選擇。選擇原料時應根據目標應用進行綜合評估，平衡經濟性與功能性需求，同時也必須注意方法學對生物炭成品的化學組成規定。

根據農業部統計資料顯示，2024 年臺灣的農業廢棄物產生量總計約有 500 萬噸，其中生物性之農產廢棄物佔 240 萬噸(表 2)，若對照 IBI 與 EBC 等單位統計的全球生物炭年產量，臺灣理論上具備相對充足的潛在原料來源。農業生產過程中，伴隨大量的生物質廢棄物產生，如稻殼、稻蒿、果園修剪廢料等，這些都是生物炭的理想原料，但也存在一些限制，由於實際供應仍會受到用途競爭、季節性供應波動、收集成本和法規限制等因素的影響。在投入生物炭量產前，需綜合考量這些因素，以確保生產的穩定性和經濟效益。

表 2 農業廢棄物排放量（單位：公噸/年）

| 年度 專案 生物性 | 農產廢棄物 | | | | | |
|-----------------|---------|-----------|---------|------|-------------|-----------|
| | 稻殼 | 稻蒿 | 廢棄菇包 | 果樹枝條 | 竹筍園 剩餘殘體 | 總計 |
| 102 | 317,912 | 1,589,564 | 105,308 | — | — | 2,012,784 |
| 103 | 346,442 | 1,732,210 | 224,400 | — | — | 2,303,052 |
| 104 | 316,346 | 1,581,732 | 225,912 | — | — | 2,123,990 |
| 105 | 317,555 | 1,587,776 | 178,202 | — | — | 2,083,533 |

| | | | | | | |
|-----|---------|-----------|---------|---------|---------|-----------|
| 106 | 350,810 | 1,754,049 | 124,142 | — | — | 2,229,001 |
| 107 | 389,959 | 1,949,796 | 155,873 | — | — | 2,495,628 |
| 108 | 358,242 | 1,791,211 | 142,935 | — | — | 2,292,389 |
| 109 | 350,146 | 1,750,729 | 156,487 | 247,396 | 171,372 | 2,676,130 |
| 110 | 312,174 | 1,560,870 | 175,975 | 248,282 | 163,416 | 2,460,717 |
| 111 | 315,155 | 1,575,777 | 153,349 | 255,840 | 161,935 | 2,462,057 |
| 112 | 292,075 | 1,460,374 | 140,437 | 245,893 | 161,935 | 2,300,714 |
| 113 | 308,588 | 1,542,943 | 141,672 | 244,469 | 165,974 | 2,403,646 |

資料來源：農業部 113 年度農業廢棄物排放量歷年表

(四)潛在風險

生物炭雖被視為一種可促進土壤健康、固碳減排的材料，但其潛在環境風險亦不容忽視。不同原料來源與熱裂解條件所生產的生物炭，其化學性質與穩定性差異甚大，可能導致重金屬或有機污染物在施用過程中釋放至土壤與水體 (Duwiejuah et al., 2020)，進而影響生態系統。此外，若施用量不當或缺乏配套措施，生物炭可能改變土壤微生物組成與氮循環 (Ding, 2023)，進而干擾農業生產或溫室氣體排放行為。更關鍵的是，這些化學與生物性質的不確定性，也會直接影響碳信用額度的核算結果。由於碳信用需仰賴對生物炭穩定性、碳封存壽命與田間效益的量化評估，不同批次生物炭的碳含量、穩定性及土壤交互作用表現若無法準確掌握，將導致碳封存效益估算偏差，增加額度計算的風險。尤其在缺乏明確的品質標準與長期田間試驗機制的情況下，生物炭的施用與碳信用核算仍具高度不確定性，須審慎評估其整體對環境與市場的影響，以確保永續應用與碳交易公信力。

(五)臺灣生物炭技術發展與應用現況

臺灣在生物炭領域之學術研究已累積相當成果，涵蓋原料特性分析、製程條件優化與機制探討等面向，並開始進行小規模田間試驗。由於臺灣農業生產過程中農林廢棄物、稻殼與稻蒿的累積量可觀，生物炭技術被視為農業循環再利用與永續處理廢棄物的重要路徑之一。基於傳統土壤改良資材存在易分解、長期效果有限等問題，將農業廢棄物以限氧、高溫熱解製成生物炭，並將其作為土壤改良劑，是目前臺灣農業重視的策略之一 (簡等，2012；陳等，2011)。

就原料特性而言，臺灣本地以稻殼、稻蒿、木材等多元來源進行炭化工藝的開發。不同炭化溫度、氣氛與預處理方式會產生結構性顯著差異，高溫炭化產物往往

具有更高的芳香族碳、較高的比表面積及發達孔隙，而空氣或氮氣條件會改變含氧官能基分佈與黑炭極性（張容蓉與鄒裕民，2007）。Tomczyk 等人（2020）則透過多種光譜儀、結構分析技術與元素鑑定，證實不同熱裂解溫度所製得生物炭的官能基組成、極性、微觀結構與其實際吸附與修復功能密切相關。張與鄒（2007）亦發現，稻蒿於 700°C、有限供氧條件下炭化的生物炭，在極性與吸附效率上均優於氮氣環境製備者，且對 2-氯酚展現顯著去除潛力。這類結構性與功能性關聯的驗證，已為生物炭未來作為兼具污染控制與碳封存潛能之環境材料提供關鍵依據（Tomczyk et al., 2020；張容蓉與鄒裕民，2007）。

土壤肥力改良研究方面，生物炭最重要的貢獻包括調節土壤酸鹼度、提升陽離子交換容量（Cation Exchange Capacity, CEC）、增加土壤有機碳、促進鹽基飽和度與微生物活性，並顯著增加土壤中可交換性氮和有效磷。田間模擬與土擾育試驗顯示，添加 2.5%-5% 生物炭可將強酸性紅壤 pH 由約 4.0 提升至 5.1，並使有機碳含量及鹽基飽和度增加一至二倍以上（簡等，2012），這對臺灣長期耕作下土壤退化嚴重的問題提供了創新解方。生物炭促進微生物生質碳量，增加微生物活性，且 5% 施用量下肥力提升最為明顯，儘管降雨導致部分養分流失，但養分保持率仍大幅優於對照組。這說明生物炭促進臺灣弱勢農地進行機能性修復、碳匯建構的潛力極高。

針對生物炭於農田碳封存及溫室氣體減量的特殊機制，近期有多篇本地實驗證據指出，在 0.5-1.5% 稻殼生物炭添加下即可顯著提高田區土壤有機碳儲量，且對於 CO₂、N₂O 等溫室氣體的排放具有減量效果。不同土壤（如酸性與中性土體）顯示出不一樣的減排型態，但在提高土壤碳匯與促使臺灣農地實現淨零目標層面，生物炭科技已經展現出整合環境調適與農業永續的多重效益（陳等，2011）。

農業產品化與法規推動方面，臺灣已成功將生物炭與其副產物醋液開發成固態及液態複方有機質肥料，不僅可減輕生物炭高碳氮比單用下造成的作物缺氮風險，又結合有機肥料、促生與病蟲防治等複合效用。這些新開發的生物炭產品，符合臺灣肥料管理規範（如 5-12 混合有機質肥料等），並已進入國產商品授權流程，田間測試亦證實其能大幅增進作物產量與品質（農業科技決策資訊平台，2024）。

生物炭在污染物吸附與環境修復應用亦逐步展開，本地研究已證實以適當條

件製備的炭化稻蒿或稻殼，不僅可移除極性有機污染物，還能處理農田重金屬、除草劑等長期土壤問題，並同時促進土壤生態與資源再利用能力（張容蓉與鄒裕民，2007）。儘管技術層面已有初步突破，臺灣在建立完整的生物炭農業應用體系與實際落地機制方面，仍存在明顯斷層，亟待透過政策整合、碳匯評估與實務推廣機制加以補足。

第二節 碳交易

自《巴黎協定》生效後，碳交易市場逐漸成為推動減碳的重要經濟機制。VCM 和強制性碳市場（Compliance Carbon Market, CCM）為企業與國家提供了減少碳足跡的選擇途徑。其核心在於以經濟誘因將減碳或增加碳封存行為轉化為具有價值的碳信用，並促使資源在市場中流動以實現成本效益最大化。

碳交易市場的發展為實現全球氣候目標提供了一條切實可行的經濟途徑，而隨著市場需求的不斷擴大和技術創新，生物炭等新興技術將在未來扮演愈發重要的角色。

（一）市場角色定位

不同角色的定位取決於它們在市場中的功能、權責以及利益所在。以生物炭作為商品之碳交易市場一般會包括幾個主要角色，各角色定位分別如下：

碳信用供給方，也就是生物炭生產者或專案開發者。供給方通常是指實際從事生物炭製造、並能證明其碳匯效果的人或機構，例如農業單位、廢棄物處理廠、專業的生物炭企業，或是循環經濟推動者。他們的核心定位就是將碳封存成生物炭，透過各種標準進行專案登記與認證，從而產出可交易的碳信用。他們的收益來源在於銷售所認證的碳信用或相關產品。

碳信用需求方，也就是碳信用購買者。這些角色包含企業、政府單位、國際組織等，通常是基於自身碳中和、淨零排放目標或符合環境法規的需求而購買。他們的市場定位在於提供資金來源，透過購買生物炭碳信用額度來實現內部的永續承諾、降低法規風險、增進品牌形象、滿足 ESG 指標或獲得稅務減免。

碳信用認證與交易平台，這些機構或組織，例如 Verra、Puro.earth、Gold Standard 或其他交易所與註冊平台，他們的定位在於制定碳信用交易規範、認證程序與品質

標準。他們的存在能提高生物炭碳信用的可信度與交易便利性，降低市場交易成本，協助供給端與需求端順利完成交易。

查證與稽核機構，第三方查證單位或顧問，他們扮演獨立公正的角色，確保碳信用的真實性、額外性與永久性，並對供給端提出的數據進行嚴謹的評估與審查，進一步增加市場的公信力。

最後則是監管者或政策制定者，通常是各國政府、環保主管機關或國際組織，他們透過法規、政策補貼、碳定價制度等，引導整體碳信用市場的發展方向與交易規範。

整體來說，生物炭碳交易市場中各個角色的定位明確且相互依存，共同形成一個完整、具效率的市場機制，而生物炭碳信用的成功交易仰賴上述各方角色各司其職、有效互動，最終達成淨零排放的共同目標。

(二)VCM

VCM 是一個由私人企業、非政府組織、政府與個人自發參與的機制，讓不同主體可以購買及出售碳信用，以自願方式抵銷排放。這類市場並非由立法機關強制規範，而是依賴市場機制和第三方標準來確保碳信用的真實性與效益。

VCM 的核心在於碳信用，即經第三方驗證後所產生、可交易的一單位減排或碳移除量。每一張碳信用代表 1 tCO₂ 或同等溫室氣體被減少或移除。碳信用通常來自多類型的氣候變遷緩解專案，例如再造林、再生能源、甲烷回收以及社區農業等。企業或個人，若無法進一步減少自身排放，可透過購買這些碳信用來達到碳中和或碳足跡降低的目標。

在 VCM 中，買賣雙方的參與完全基於自我承諾。他們的動機可能來自環境責任、企業形象、消費者或股東壓力，以及預備未來潛在規範。相較於政府規範下的CCM，VCM 更具彈性，且不受排放配額限制。

VCM 為企業提供了自主減碳以外的補充機制，並進一步促進資金流入永續發展與碳減排專案，特別是在新興市場與發展中國家，有助於推動在地社會經濟發展，並加速其邁向低碳轉型。然而，VCM 所涉及的專案品質與碳信用真實性參差不齊，部分專案亦曾受到誇大減排效益的質疑。因此，部分國際碳認證機構致力於建立方法學與審查機制，確保碳信用具備外加性、永久性，並可經由第三方獨立驗證。

在各國不斷提高減排目標、收緊排放上限的背景下，市場對高品質碳信用的需求持續攀升。與此同時，VCM 也因企業與投資人積極參與氣候行動而快速擴張，對透明且具可信度的減排專案需求日益增加。

(三) CCM

在全球氣候行動的推動下，CCM 成為多數國家管理及減少溫室氣體排放的重要制度。與 VCM 不同，CCM 建立在法律或政策基礎上，政府針對特定產業或部門劃定年度碳排放上限，參與者必須在政策規定下達到標準，違規則面臨罰則。最具代表性的案例是歐盟排放交易體系 (European Union Emission Trading Scheme, EU ETS)，這類市場的核心機制是總量管制與交易 (cap-and-trade)，藉由逐年削減排放總額，驅動產業升級技術以採取更低碳的運作模式。此外，CCM 參與者需要嚴格回報排放數據，經第三方查驗以保障市場操作的公平與透明。

臺灣近年積極調整氣候政策，以回應國際永續發展趨勢。2023 年通過《氣候變遷因應法》，並正式將 2050 年淨零排放目標納入國家法定路線圖。依據該法規，臺灣建立全國性碳排放管制架構，規範年排放量逾 25,000 tCO₂e 的高排放事業單位，須申報其溫室氣體排放量，並接受第三方獨立查證。

為促進排放減量，政府將自 2025 年開始向這些高排放企業徵收碳費。碳費費率則由相關委員會依排放現況、產業競爭力等多項因素調整。

為配合碳管理，臺灣成立碳權交易所 (TCX)，推動國內外高品質的碳信用買賣。企業若無法完全自主減排，則可結合購買碳信用以抵減部分碳費，達到更靈活的合規策略。整體而言，臺灣的排放管制制度採分階段、逐步收嚴的規劃，旨在協助產業平順過渡，同時與國際永續規範接軌。

(四) 生物炭碳交易市場現況

1. 國際生物炭碳交易市場現況

國際生物炭碳交易市場正快速成長與轉型，主要受益於生物炭在碳移除、永續農業領域的卓越效益，以及企業對高品質碳信用需求的提升。

市場規模方面，根據 Data Bridge Market Research (2024 年) 的預測，全球市場將在未來十年穩定成長，預估將由 2024 年的約 7.27 億美元規模，以約 23.2% 的

年複合成長率快速增長，至 2032 年達到約 37.9 億美元之規模；其他相關研究則預測至 2029 年市場規模將達 39.11 億美元，具體數據視研究定義與市場範圍的差異而有所不同（Knowledge Sourcing Intelligence, 2024）。

需求與供應方面，市場對高品質生物炭的需求急遽攀升，尤其以碳移除信用的需求最為明顯。根據許祖菱（2025）的報導，截至 2025 年，全球約 62% 的高品質生物炭供給量已透過長期採購合約被企業提前鎖定，Microsoft、Google 等企業為此類碳信用的主要買家。預測至 2026 年，全球約 30% 的預期生產能力亦已透過預售合約進行銷售，導致市場競爭加劇，並推升高品質生物炭碳信用的交易價格（Supercritical, 2025）。

2. 臺灣生物炭碳交易市場現況

2025 年臺灣生物炭市場規模約達 326 萬美元，未來幾年內市場成長前景樂觀，預估將以年複合成長率 17% 持續擴大（Moharir, 2025）。此一快速發展主要受到農業剩餘資材再利用需求增加、政府循環經濟政策的推動，以及農業領域對碳移除技術與土壤改良的高度需求所帶動（Wu, 2019）。

在政策層面上，雖然臺灣於 2017-2020 年間曾投入經費推動「生物炭旗艦計畫」，涵蓋原料供應、製程技術與應用推廣等層面，但由於當時缺乏碳移除政策框架與碳市場制度連結，致使計畫成果難以制度化與產業化，相關公開資料亦顯不足，顯示其政策延續性與影響力有限。儘管目前生物炭尚未正式納入臺灣的法規體系，但行政院農業部農業藥物試驗所（2020）參考 IBI 的標準，制定出臺灣版的生物炭品質規格與安全管理規範草案，為未來生物炭產業發展提供規範依據。

從產業結構的角度來看，目前臺灣的生物炭生產主要以農會、合作社、地方社區及農產行銷團體等集體組織為主，透過協助小農或農民團體建構生產系統，以解決小規模農戶難以獨立投資大型設備的困境。在環境部推動土壤碳匯的政策支持下，這些組織整合資源，配合政府補貼與技術輔導，加速生物炭生產的規模化與商業應用。

第三節 國際碳認證機構與生物炭方法學

碳市場的需求不僅關注於各類碳減量與碳移除技術的有效性，更著重其透明性與可量化性。所有參與市場的減排與碳封存技術均需以可驗證的科學基礎為依據，並在標準化框架下進行效益量化，此對於尚處發展初期的新興碳封存技術而言更是不可或缺的條件。

(一) 國際碳認證機構

國際碳認證機構的建立源自於對碳減量與碳移除技術專案成效的嚴格標準。當碳交易成為國際間減碳的合作橋樑，如何證明一個專案所減少或移除的碳排放是真實、可量化且永久的，成為市場運作的核心。於是國際碳認證機構應運而生，它們不僅制定了嚴謹的標準，規範不同類型專案的計算、監測與報告流程，更建立了獨立的第三方查驗證體系，確保每一張碳信用都經過層層把關。

1. Verra

Verra 是全球領先的碳標準管理組織，其前身為 2007 年設立的非營利管理機構，專責推動碳驗證標準（Verified Carbon Standard, VCS）體系。VCS 最早於 2005 年由業界及投資顧問構想，2006 年由國際氣候組織、國際碳排放協會等共同推動發展。2018 年更名為 Verra，持續主導 VCS 的管理與更新，並推動國際碳市場的發展。成立初衷為協助私部門、各國政府與民間組織推動氣候行動與永續發展，其成員多來自環境與商業領域。除 VCS 體系外，Verra 亦開發與管理多套國際認證標準，包括塑膠減量標準（Plastic Waste Reduction Standard, PWRS）、永續發展驗證與影響標準（Sustainable Development Verified Impact Standard, SD VISta）及減少毀林與森林退化造成的溫室氣體排放（Reduced Emissions from Deforestation and Forest Degradation, REDD+）等。其方法學涵蓋領域廣泛，橫跨農業、林業、再生能源、工業製程、廢棄物處理與土地利用管理等，是目前全球 VCM 中最具規模與影響力的標準制定機構之一（圖 2）。

Projects by registry

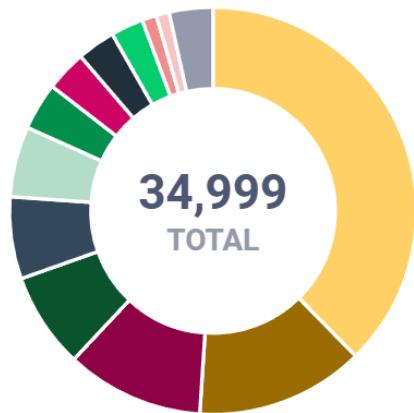
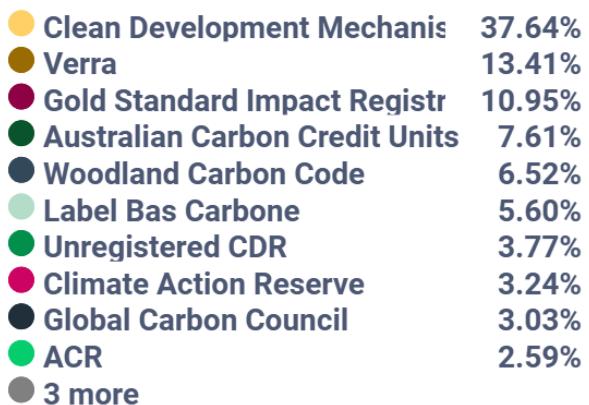


圖 2 2025 年 7 月碳權專案依登錄機構類別的分布情形

在 Verra 管理架構中，VCS 為最核心且應用最廣的碳信用標準體系，負責提供專案開發者進行碳移除量化與認證的作業框架。VCS 細分多種領域專屬的方法學，專案開發者需依據不同技術選用相應方法。VM0044 即為 VCS 下的一項針對生物炭專案所制定的方法學，其規範生物炭於土壤與非土壤用途中，如何量化碳封存效益、確認其穩定性並完成減量計算，作為申請碳信用額度的依據（圖 3）。經驗證符合標準的專案，將核發 Verified Carbon Units VCU），其依據 VCS 架構所設計的碳信用額度，是目前全球 VCM 中應用最廣且具代表性的標準之一。每張 VCU 對應 1 噸二氧化碳當量（carbon dioxide equivalent, CO₂e）之減量或移除量，

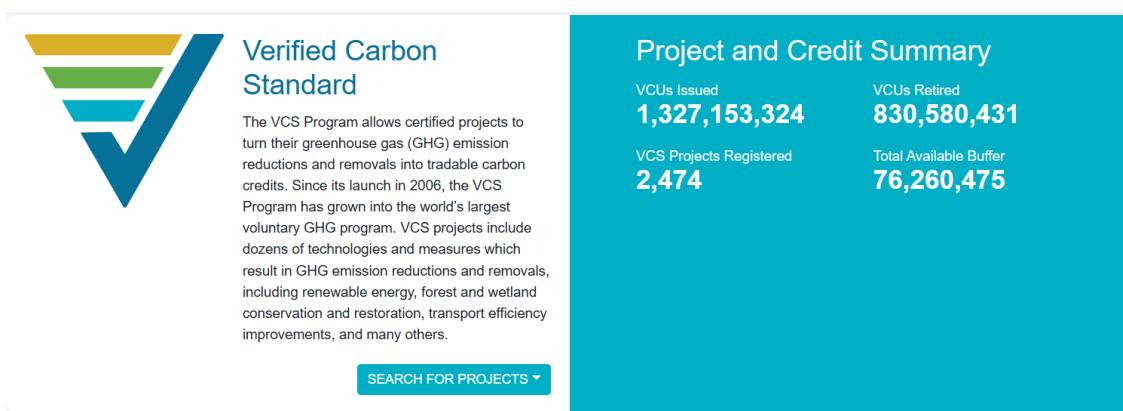


圖 3 VCS 專案成果統計

2. Puro.earth

2017 年，Antti Vihavainen（目前為 Puro.earth 的共同創辦人及執行長）向北歐領先的潔淨能源公司 Fortum 提出構想，認為當時大氣中 CO₂含量過高，雖然已有碳捕集與封存（Carbon capture and storage, CCS）等 NETs，但缺乏有效的商業模式來推動這些技術的應用。在這一背景下，Puro.earth 應運而生。Puro.earth 已制定五大主要碳移除認證方法，包含生物炭、地質碳封存（Geologically Stored Carbon）、碳酸化材料（Carbonated Materials）、強化岩石風化作用（Enhanced Rock Weathering）及生物質陸域封存（Terrestrial Storage of Biomass）。經驗證符合標準的專案，將核發二氧化碳移除證書（CO₂ Removal Certificate, CORC），一張 CORC 代表移除 1 tCO₂e。此外，「直接空氣捕集與海洋封存」及「海洋缺氧碳封存」兩種方法學自 2025 年起列為新興類別，目前仍處於實驗階段。

（二）方法學概述

生物炭方法學的發展，如一條從實驗室走向田野、再進入國際碳交易舞台的進化之路，蘊含著標準建立、技術創新與市場實踐的多重轉折。

最初，生物炭僅被視為農業副產物，應用於土壤改良和廢棄物處理。然而隨著國際間對碳封存與碳信用交易的關注升溫，生物炭的碳移除潛力開始受到重視。這促使各國專家與組織積極投入生物炭方法學的研發，從生產技術、品質控管到碳封存認證，逐步建立起一套完整的國際規範。

EBC 和 IBI 率先針對生物炭的品質、安全性與碳封存能力制定明確規範。這些標準不僅要求生產過程環保無害，更強調產品的可追溯性與應用安全。隨後，Puro.earth 和 Verra 等國際碳認證標準將生物炭納入碳移除認證體系，規範碳計算、監測與第三方查驗，讓生物炭得以正式進入全球碳市場。

隨著標準化腳步推進，生物炭生產技術也迎來革新。從傳統熱裂解，到自動化、數位監控的現代化系統，生產規模與產品品質大幅提升。原料來源也從單一農林廢棄物，擴展到工業副產物與入侵外來種植物，展現資源循環與在地化的永續精神。為了滿足不同領域的應用需求，生物炭產品更朝向功能化、多元化發展，從土壤修復、水質淨化到建材能源，應用場域不斷拓展。

但是生物炭方法學的發展並非一帆風順。如何精確評估碳封存的永久性、計算生產過程中的碳排放、分配熱裂解製程中的產物產率，以及嚴格控管重金屬與有機污染物，都是國際間持續討論與修訂的重點。各國也在政策與市場層面積極推動生物炭應用，透過補助、法規與市場機制，鼓勵產業創新與規模化發展。

(三) 生物炭方法學之基本框架

生物炭方法學是一套針對生物炭製備、應用及碳封存效益的全流程指導與量化框架，通常涵蓋以下幾個關鍵步驟：

1. **原料選擇**：評估生物質原料的永續性和來源合法性，確保原料不會對生態或糧食安全產生負面影響。
2. **製備過程**：設定標準化的製備條件，確保生物炭符合碳封存要求。
3. **應用方式**：生物炭可用於各種用途，專案活動需確保應用過程中 CO₂ 不被重新釋放。
4. **外加性**：其主要原因是為了確保碳信用交易能真正對氣候變遷產生實質效益。只有當一個專案在沒有碳信用收入的情況下無法自行執行時，其所產生的碳排放減量或移除才能被視為額外的、有效的貢獻。如果一項減排行爲本來就會發生，即使沒有碳市場的支持，其產生的碳信用就不具真正的環境貢獻，反而可能導致碳排放在總量上增加。
5. **碳封存量計算**：以科學數據為基礎，估算生物炭的長期碳封存效益，並計入全生命週期的碳足跡。
6. **監測與查證**：通過監測和第三方查證，保證碳封存效果的可靠性和透明性。
7. **不重複計算**：專案在申請時需聲明未於其他標準重複申請或發放碳信用額度，並會進行第三方查核與文件審查。

第四節 LCA

是一種系統性方法，用來評估一項產品或服務在整個生命週期內對環境造成的影响。目的是盤查從原料開採到生產、使用、報廢處理、回收和最終處置（即從搖籃到墳墓）等各階段，分析出有哪些潛在因素對環境造成衝擊，進而設計開發或改善產品/服務的製程，達到對環境衝擊最小化。

(一)概念與重要性

Puro.earth Biochar Methodology 明確要求依照 ISO 14040/14044 標準進行 LCA，用以界定生物炭生產作業之系統邊界、功能單位、輸入與輸出流量等，並於搖籃到墳墓範圍內進行淨移除量估算。此種以 LCA 為基礎的量化方式，確保生物炭生產過程中所涉及的所有直接與間接碳排放均被納入考量。

LCA 有四個階段（丁執宇, 1998；Muralikrishna & Manickam, 2017），由國際標準化組織（International Organization for Standardization, ISO）14040 系列標準所界定（圖 4），分別為：目標與範疇界定（Goal and Scope Definition）、生命週期盤查分析（Life Cycle Inventory, LCI）、生命週期衝擊評估（Life Cycle Impact Assessment, LCIA）、以及闡釋（Interpretation）。

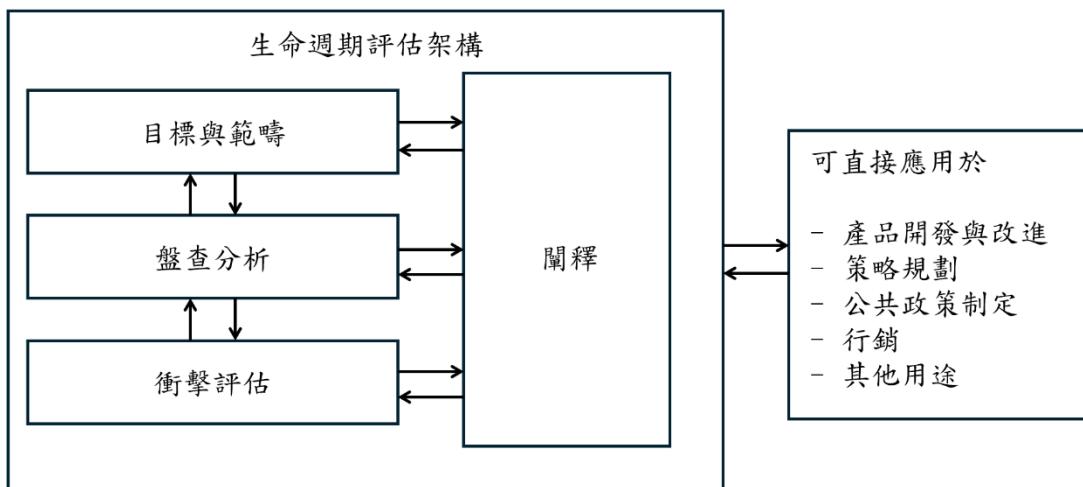


圖 4 生命週期評估之四個階段（資料來源：ISO 14040:2006）

(二)生物炭生命週期系統的建構方式

1. 目標與範疇定義

(1) **目標：**明確闡述進行 LCA 的動機與應用目的，例如評估生物炭生產與施用過程中可能產生的環境影響。LCA 亦有助於支持生物質熱裂解技術的規模化推進，並用以比較不同製備技術（如熱裂解、氣化、水熱碳化）在碳封存潛力與溫室氣體減排效果上的相對優勢，作為技術選擇與碳信用專案規劃的重要依據。

(2) **範疇：**定義研究的邊界。對於生物炭，通常採用「從搖籃到墳墓」(cradle to grave)

的方法，涵蓋從原料獲取、運輸、生物炭生產過程、運輸到田間、農業應用以及最終處置或在土壤中的長期存留。

(3) 功能單位：用來量化產品或服務特定功能的標準化單位，作為碳足跡或環境影響比較與計算的基礎，合適的功能單位取決於研究目的。

- A. 比較生產技術：可以定義為「從生物質廢棄物生產 1 噸生物炭」。
- B. 評估農業應用影響：可以定義為「在單位土地面積（例如 1 公頃）上施用生物炭一年」或「生產單位數量的農產品（例如 1 公斤稻米或穀物）」。

(4) 衝擊類別：選擇要評估的潛在環境影響類別。與生物炭相關的文件中經常提到的衝擊類別包括：全球暖化潛勢 (Global Warming Potential, GWP)、溫室氣體排放、酸化、優養化 (eutrophication)、毒性、資源枯竭、土地利用等等。

2. LCI

(1) 數據收集 (Data Collection)：收集研究範圍內所有單元過程的詳細數據。包括原料的組成和性質、生產過程的參數（溫度、加熱速率、停留時間、反應器類型）、能源消耗、水使用、輔助材料使用、以及所有輸入和輸出的質量與能量流。輸出包括生物炭、Bio-oil、syngas 的產率和組成，以及向空氣、水和土壤的排放物和固體廢棄物。應用階段的數據包括施用量、對土壤和作物的影響數據。

(2) 系統建模 (System Modeling)：根據定義的系統邊界建立過程流程圖或模型，量化所有相關流程與功能單位的關係。

(3) 多功能性處理 (Handling Multifunctionality)：當過程產生多個有價值的產品時（生物炭生產同時產生 Bio-oil 和 syngas），需要處理其環境影響的分配。透過擴展系統邊界，增加副產品的替代效益，例如替代化石燃料或其他產品的生產，以此來抵消部分環境負荷。

3. LCIA

將盤查分析的結果轉化為潛在的環境衝擊。

- (1) 分類 (Classification)：將盤查結果中的特定排放物或資源消耗物歸入其相關的衝擊類別，例如將 CH₄ 和一氧化二氮 (N₂O) 歸入全球暖化類別。
- (2) 特徵化 (Characterization)：使用科學模型計算每種排放物或資源消耗對各個衝擊類別的貢獻。例如，使用 GWP 因子將 CH₄ 和 N₂O 排放量轉換為 CO₂e。

4. 闡釋

- (1) 找出熱點(Hot Spots)：識別對整體環境影響貢獻最大的生命週期階段或過程。對於生物炭，熱點通常包括生產過程的能源消耗 以及應用階段對溫室氣體排放和碳封存的影響。
- (2) 敏感度分析(Sensitivity Analysis)：測試數據變動或方法學選擇對結果和結論的影響，以評估研究的穩健性。
- (3) 不確定性分析(Uncertainty Analysis)：考慮數據的不確定性對結果的影響。
- (4) 結論與建議：根據評估結果，得出結論並提出改進建議。建議可能包括優化生產參數、選擇更合適的原料、改進農業應用方法、最大化利用副產品等，以減少環境負荷並提高永續性。

第五節 方法學案例

為進一步理解生物炭方法學之實務應用方式，本節將介紹兩種生物炭專案案例，分別對應於 VM0044 與 Puro.earth Biochar Methodology。透過實際專案與數據分析，呈現兩種方法學在專案邊界設定、碳排放計算、永續性標準與監測要求上的異同，作為後續評估制度設計與技術可行性的依據。

(一) VM0044 應用於印度奧迪薩邦綜合農業廢棄物之案例

因印度農業部門面臨露天燃燒、生物質腐爛與傳統農業廢棄物不當處理問題，導致溫室氣體排放與環境惡化等狀況。循此，專注於環境與農業的永續發展之企業 Together for Restoration，於 2023 年 9 月實行計畫，透過農場端生產與施用生物炭之方式實現碳封存，並依據 VM0044 方法學向 Verra 認證申請碳信用。

1. 專案概述

隨著人口成長與農業生產規模擴大，農業廢棄物產量亦迅速增加，對環境造成日益嚴重之壓力。在印度，受限於資源與基礎設備，多數農民仍依賴露天燃燒與自然分解等傳統方式處理農業廢棄物。然此類處置方式將導致大量溫室氣體排放：露天燃燒將產生 CO₂，而生物質廢棄物分解則會產生 CH₄，兩者皆對地球環境產生負面影響。這些被忽視之農業廢棄物蘊藏著作為生物炭原料的巨大潛力，若其能得到

合理利用將可轉為有價值的碳匯，印度農業部門應實施強而有力的生物質廢棄物管理策略之必要性。

有鑑於此，Together for Restoration 以農業廢棄物轉化成氣候行動的具體實踐途徑為題，申請 VM0044 專案，該專案旨在幫助小農將農業廢棄物轉化為用於土壤改良之生物炭。執行本案之所在地是印度奧迪薩邦（緯度 17.31N 至 22.31N，經度 81.31E 至 87.29E），生物炭生產者為當地的 5000 名農民，執行時程為 7 年，並可延續兩次，總計長達 21 年。第一個計入期為 2023 年 10 月 16 日至 2030 年 10 月 15 日。根據估算，預計於第一個七年中，每年可減少 110,760 tCO₂e，換言之七年內共可減少約 775,320 tCO₂e（表 3）。

表 3 專案預估溫室氣體減量或移除量

| 年份 | 預估溫室氣體減量或移除量 (tCO ₂ e) |
|-----------------------------|-----------------------------------|
| 2023 年 10 月 16 日至 12 月 31 日 | 23,366 |
| 2024 年 | 110,760 |
| 2025 年 | 110,760 |
| 2026 年 | 110,760 |
| 2027 年 | 110,760 |
| 2028 年 | 110,760 |
| 2029 年 | 110,760 |
| 2030 年 1 月 1 日至 10 月 15 日 | 87,394 |
| 估計總減少排放量 | 775,320 |
| 計入期 | 7 年 |
| 平均每年減少排放量 | 110,760 |

資料來源：Project Reignite: Turning Farm Waste to Climate Action (Verra, 2023)

2. 本案例運作模式說明

該專案執行宗旨在於將農業廢棄物從露天燃燒或任其自然腐爛分解等會增加溫室氣體之傳統處理方法，轉變為在農場生產與應用生物炭 (Together for Restoration, 2023)。過程是以盡量低能耗的方式進行，例如該案例將農業廢棄物在農場內風乾或晾乾，以取代工業設備進行熱乾燥或脫水處理；生物質在農場內的鋼盾土坑中進行熱裂解處理，減少運輸造成的碳足跡。

農民使用火焰帷幕熱裂解 (flame curtain pyrolysis) 技術進行生產生物炭，熱裂解設備為鋼盾土坑 (steel-shield soil pits) (圖 5)。每位農民於自身農場中，皆設有此設備並負責維護。生物炭生產過程第一步先在窯內點燃火焰，燃燒之炭灰將

擴散形成窯底的第一層，然後在炭灰上方添加一層薄薄的生物質，而此薄層會迅速加熱並開始釋放 syngas。上升的 syngas 會被上方的火焰捕捉，並與從窯頂進入的空氣反應燃燒。當炭化的生物質外部開始出現灰燼時，再均勻鋪上一層生物質。製程中上方火焰與下方熱裂解層的對流和輻射熱能持續加熱新鋪的生物質層，促使其開始熱裂解。在燃燒區形成的火焰帷幕有效地保護了底層的生物炭，防止氧氣進入而被氧化。生物炭受到火焰帷幕的隔絕，使其穩定產生。整個生產過程將一直重複手動分層生物質，直到鋼盾土坑填滿。一般而言，一座鋼盾土坑的預期使用壽命約為三年。由案例可見，此方法雖非機械化，但已達到 VM0044 認證為可行技術。

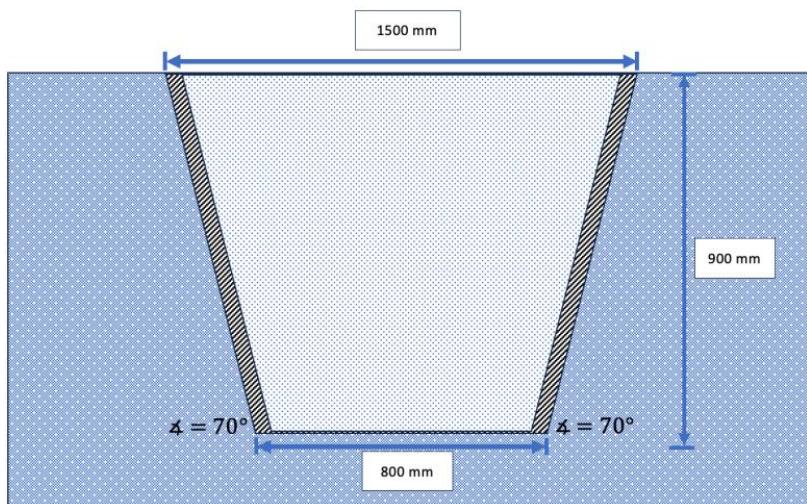


圖 5 鋼盾土坑示意圖 (Verra, 2023)

本案例亦提到，進行相關的生產前，農民會經過培訓，包括理論知識如火焰帷幕熱裂解原理、品質控管程序、安全協議以及熱裂解設備維護；而經驗豐富的田野專員會進行現場實作，協助農民熟悉實際操作流程，有效掌握生物炭製程中各項關鍵技術。培訓期間農民也要學習如何處理突發狀況，例如火候不佳、天氣突變或其他緊急情況等。最後在培訓計劃結束後，生物炭生產者需要通過嚴格之現場實地考核，在田野專員的監督下，必須成功生產出符合專案標準之高品質生物炭。

3. 本案例之方法論應用

該案之專案開發者將取得生物質廢棄物、生產生物炭以及確保生物炭用於土壤應用之作法與 VM0044 方法學要求進行技術範疇對照，並將比較的內容羅列於一表中。本研究將其內容轉錄於附錄一中。

(1) 本案例之專案邊界

該案為討論生物炭之生命週期，有進行邊界劃分，其劃分如圖 6 所示。可看到其分別討論了生物質來源階段、生物炭生產階段、生物炭應用階段之碳排放。不過由於以上三項作業皆於農場內進行，僅生產階段計設備的熱化學轉換排放量，造成約 29,400 tCO₂e 之排放。

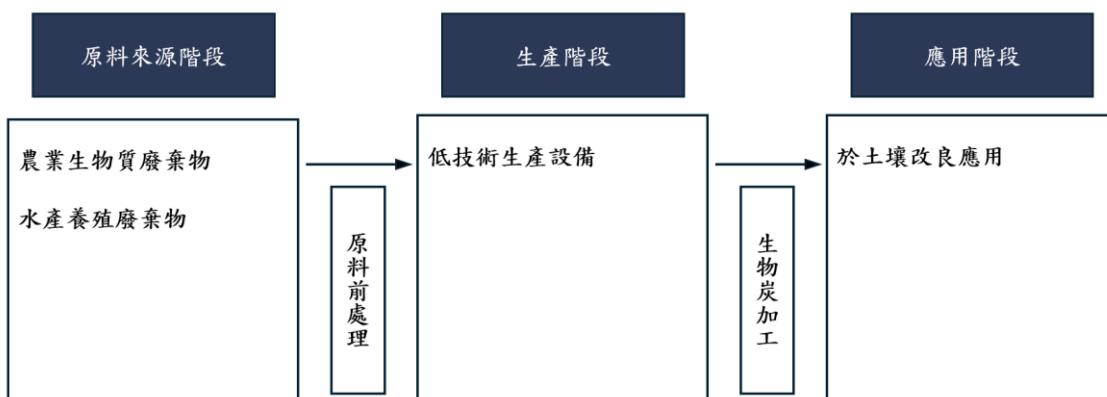


圖 6 案例專案邊界 (Verra, 2023)

此外，該案在討論排放邊界時有羅列包含或排除之溫室氣種類，分別對每個排放專案討論是否要包含 CO₂、CH₄、N₂O。

4. 碳匯效益計算

該案進行生物炭之碳匯效益計算，其中，其農業廢棄物有包含多種不同原料(稻蒿、樹木修剪、竹子修剪、玉米芯、樹牽牛、布袋蓮)，其估算單位設備中含有的量也各有不同(表 4)。不同原料之碳轉換係數一有差異，需依照原料對應的係數計算(表 5)。最後將有機碳含量換算為 tCO₂e，該案活動預計移除量減去估算之碳排放量，最後得出年減碳量為 110,760 tCO₂e。

表 4 每個設備之估計生物炭產量

| 原料 | 每年 1 個生產設備之生物炭乾重估計量 (噸) |
|------|-------------------------|
| 稻蒿 | 9.5 |
| 樹木修剪 | 1 |
| 竹子修剪 | 2 |
| 玉米芯 | 1 |
| 樹牽牛 | 1 |
| 布袋蓮 | 0.5 |

資料來源：Project Reignite: Turning Farm Waste to Climate Action (Verra, 2023)

表 5 不同苗木種類之碳含量

| 原料種類 | 細項 | 碳含量 ($\text{gC g}^{-1}\text{Dry Mass}$) |
|-------|-------------------|---|
| 稻殼和稻蒿 | 稻蒿 | 0.49 |
| 木頭 | 樹木修剪 | 0.77 |
| | 竹子修剪（僅取自成熟木質莖的竹子） | |
| 草本植物 | 玉米芯 | 0.65 |
| | 樹牽牛 | |
| | 布袋蓮 | |

資料來源：Method for Estimating the Change in Mineral Soil Organic Carbon Stocks from Biochar Amendments: Basis for Future Methodological Development (IPCC, 2019)

(二) Puro.earth Biochar Methodology 應用於芬蘭諾基亞森林生物質之案例介紹

一家位於芬蘭諾基亞的企業 Carbofex Oy，致力於推動生物炭技術作為一項關鍵的氣候解決方案。作為全球首家經 Puro.earth 認證的生物炭生產商，自 2019 年首次發行 CORCs 以來，該公司透過其創新的熱解製程，將生物質高效轉化為具有極高穩定性的生物炭，從而實現顯著的碳移除效果。

1. 專案概述

Carbofex 的生物炭生產過程，是將來自永續管理芬蘭 PEFC 認證森林的雲杉疏伐木材作為原料。這些木材若在正常情況下會被留在森林中分解或燃燒，導致 CO_2 排放。然而，透過將木材在無氧高溫環境下進行熱解，其所儲存的有機碳被轉化為穩定的固態生物炭，能夠在土壤中封存長達數百年乃至數千年。在生產過程中，熱解產生的氣體會被回用於熱解反應器加熱，而多餘的能量則被用於抵銷坦佩雷區域供熱系統中泥炭和天然氣的消耗，進一步提升了其環境效益。

除了核心的碳移除功能，Carbofex 所進行的專案還帶來了多項共同效益。首先，透過利用原本會分解或燃燒的生物質，Carbofex 有效避免了這些生物質腐爛所產生的碳排放。其次，對森林進行永續的經營管理，有助於降低森林火災、昆蟲侵害和疾病的風險。在應用層面，Carbofex 生物炭可以替代傳統肥料、濾水器或建築材料，從而減少了這些材料在生產過程中產生的碳排放。當生物炭用於溫室園藝或

農業的基質及土壤改良時，甚至有高達 10% 的產量增加，這不僅提高了農業效率，也意味著生產相同作物所需的土地更少。最後，生物炭的製造過程在整個價值鏈上創造了綠色就業機會，從木材採伐到產品分銷和使用。

在碳信用成果方面，根據 DNV (2023, 2024, 2025) 的稽核報告，Carbofex 生物炭產線在連續三年的驗證中皆符合 Puro.Earth 標準規範。2022 年 9 月至 2023 年 2 月期間獲得 421.53 個 CORCs；2023 年 3 月至 12 月的合格 CO₂e 移除量為 1218.37 公噸；而 2024 年度則達到 1097.48 公噸二氧化碳當量，展現其穩定且具規模化的碳移除能力。

第三章 研究材料與方法

第一節 生物質廢棄物來源

根據農業部 113 年統計資料（表 2），國內稻殼、稻蒿、廢棄菇包、果樹枝條與竹筍園殘餘剩體產出逾 240 萬公噸，將近佔生物性農業廢棄物總產生量（約 500 萬公噸）一半，其中當年度稻殼、稻蒿各佔農產廢棄物 13% 和 64%（表 6），若能依據國際方法學將其導入生物炭製程，除了就地翻耕掩埋及其他會導致溫室氣體排放之作業外（圖 8），更可作為臺灣發展生物炭之可行資源。

表 6 113 年農產廢棄物總量及比例

| 農產廢棄物 | 產生量(公噸) | 佔總量百分比 |
|---------|-----------|--------|
| 稻殼 | 308,588 | 13% |
| 稻蒿 | 1,542,943 | 64% |
| 廢棄菇包 | 141,672 | 6% |
| 果樹枝條 | 244,469 | 10% |
| 竹筍園剩餘殘體 | 165,974 | 7% |
| 總計 | 2,403,646 | 100% |

資料來源：農業部 113 年度農業廢棄物排放量歷年表

稻殼、稻蒿妥善處理量

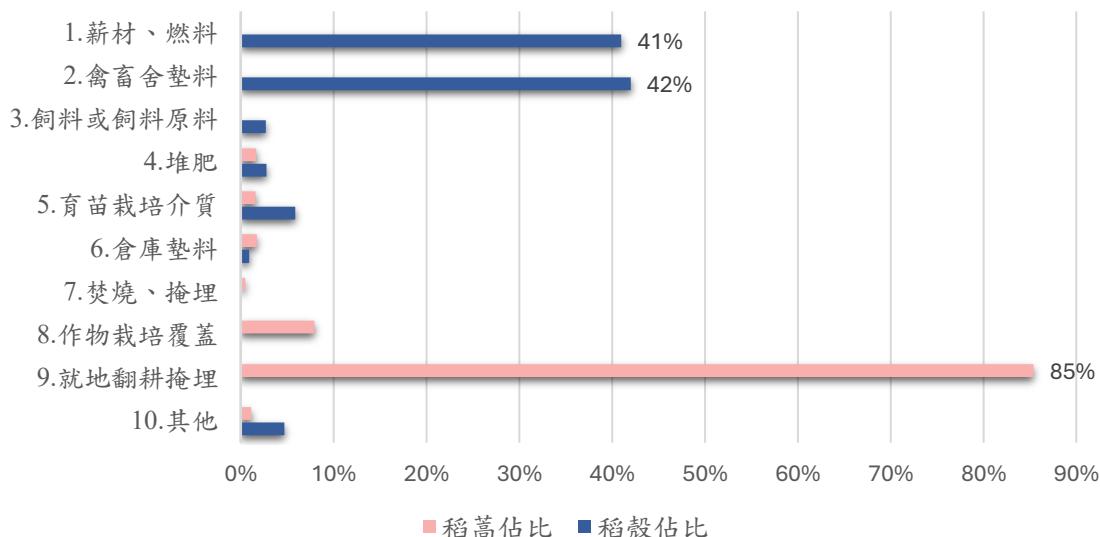


圖 7 113 年稻殼、稻蒿處理方式及妥善處理量

第二節 情境假設

(一) 處理容量假設

本研究之高技術設備參考 PX 500 連續自熱式乾式熱裂解系統(PYREG GmbH, Dörth, Germany)。專為生物質或污泥等生物質廢棄物的資源化利用設計，運用先進的慢碳化工藝將廢棄物轉化為高品質生物炭。



圖 8 PX 500 概念圖

設備規格（表 7）符合 VM0044 高技術設備的四項規範。其製程中所產生的所有 VOCs 與 CH₄ 均導入高溫二次燃燒室進行熱氧化處理，確保不直接排放溫室氣體，達到無害化排放的目標。其次，PX 500 擁有超過 70% 的熱能回收效率，所產生的碳化熱能可回收並再利用於現場供熱或其他工業應用，符合國際熱回收標準。該系統配備完善的污染防治設備，包括熱氧化裝置與多級廢氣處理系統，能有效移除有機污染物、PM 及異味，其廢氣排放均符合國家與歐盟標準。PX 500 全程搭載自動化溫度感測與紀錄系統，可即時監控碳化爐與燃燒室的溫度，並完整保存所有溫度數據，確保製程透明。

表 7 PX 500 規格

| 專案 | 規格 |
|----------------------|--------------------------|
| 燃料處理量 | 500kW |
| 年處理量 | 710-1,100 噸原料 |
| 生物炭年產量 | 180-300 噸（乾重） |
| CO ₂ 封存潛力 | 700 tCO ₂ e/年 |
| 最大熱輸出 | 200kW _{th} |

| | |
|---------|-----------------------|
| 系統用電 | 最大 12kW _{el} |
| 年運轉時數 | 最高 7,000 小時 |
| 系統尺寸 | 12 x 6 x 5 公尺 |
| 生物炭合格認證 | EBC、Puro.earth |
| 監控/自動化 | 數據自動化、遙控運維 |

資料來源：PYREG 公司官方網站（PYREG, 2024）

（二）設備配置

為提升生物炭製程的資源利用效率並降低運輸過程所造成之碳排放，本研究之熱裂解設備設置規劃依據臺灣各區域稻穀產量分布（表 13）進行區域化配置。考量原料供應之穩定性，設定稻穀產量較高之西部平原地帶配有較多熱裂解設備，提升生物炭生產效率。具體設置地點包括北區桃園市、中區臺中市、南區嘉義縣，以及東區花蓮縣，分別對應各區域之主要稻作產區或鄰近之工業區。

1. VM0044 热裂解設備數

為進行臺灣地區農業廢棄物熱裂解轉化生物炭之潛勢評估，本研究依據農業部統計資料，以及本方法學規範之最大農業廢棄物利用比率 50%，推估全臺每年可利用之農業廢棄物總量約為 840,903 公噸。考量處理技術之實務操作限制，本研究採用之熱裂解設備假設其單位處理能力為每年上限 1,100 公噸。進一步基於農業廢棄物於不同地區之產生量比例，並考量就地處理以減少運輸碳排與提升資源效率，本研究假設於全臺劃分四大區域設置處理設備，分布如下：北區 95 座、中區 387 座、南區 218 座、東區 67 座。各區設備數量依區域年廢棄物產量比例進行配置，據此計算，若欲全面處理上述廢棄物總量，理論上全臺需設置約 767 座處理設備。

2. Puro.earth Biochar Methodology 热裂解設備數

本研究依據農業部統計資料，以及本方法學規範之最大農業廢棄物利用比率 70%，推估全臺每年可利用之農業廢棄物總量約為 1,177,265 公噸。依熱裂解設備之假設處理能力為每年上限 1,100 公噸，進一步基於農業廢棄物於不同地區之產生量比例，並考量就地處理以減少運輸碳排與提升資源效率，全臺四大區域設置處理設備分布如下：北區 133 座、中區 541 座、南區 305 座、東區 94 座。各區設備數

量依區域年廢棄物產量比例進行配置，據此計算，若欲全面處理上述廢棄物總量，理論上全臺需設置約 1,073 座處理設備。

(三) 排放係數假設

本研究中在運輸、能源使用及其他造成碳排之係數，採用環境部公告之數值（表 8）。

表 8 各項排放係數數值

| 專案 | 排放係數 |
|------------------|--------------------------------|
| 營業大貨車(柴油) | 0.131 kgCO ₂ e/t km |
| 113 年度電力 | 0.474 kgCO ₂ e/kWh |
| 高密度聚乙烯 (HDPE) | 2.21 kgCO ₂ e/kg |

第三節 溫室氣體移除公式

在生物炭碳移除專案的研究與實務執行中，科學且嚴謹的量化方法與標準化的申請流程，是確保專案環境效益、提升透明度與促進國際認可的關鍵。本節說明本研究所採用之方法學核心公式及專案申請與驗證流程。依循方法學所規範之登錄、監測與審查機制，確保專案成果符合標準規範，並成功取得具市場交易資格之碳信用。

(一) VM0044

以下翻譯並引用自 VM0044 之計算式的部份。本部份盡量保留 VM0044 之原始計算式，而針對本研究設定之臺灣情境的計算為呈現的簡便化而對代稱稍有改動，此改動於結果與討論章節中說明。此方法學旨在提供全球適用的標準與程序，用以量化改進廢棄物處理與處置（waste handling and disposal, WHD）後的溫室氣體減排效益。專案活動主要包括三大階段：取得生物質廢棄物、生物炭的生產，以及將生物炭應用於土壤或非土壤用途。新建的生物炭生產設備須確保溫室氣體效益僅針對實際用於合格應用的生物炭授予，而專案起始時間則定義為首次生產生物炭的時點。

核心目標是實現永續廢棄物管理，並透過生物炭的生產與應用減少溫室氣體排放，特別是 CO₂ 和 CH₄。

1. 專案邊界

專案邊界是指專案活動所涵蓋的地理範圍和操作範疇（圖 9）。定義專案邊界的目的的是確定哪些排放源和溫室氣體需要被納入專案的計算中。

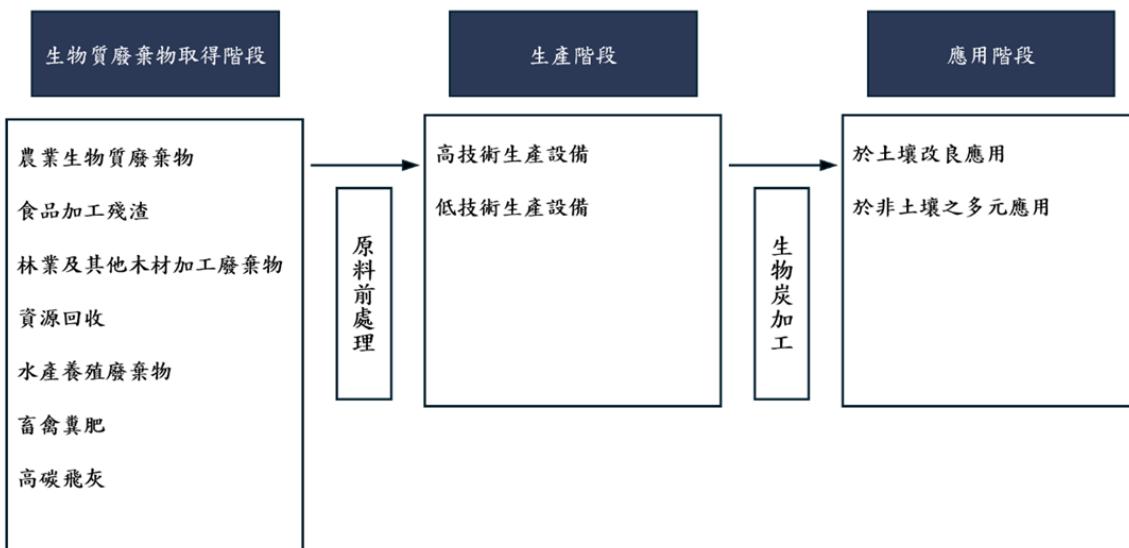


圖 9 專案邊界範疇

(1) 生物質廢棄物取得階段

包括所有用於生物炭生產的生物質廢棄物之收集與處理活動。

(2) 生產階段

熱裂解或氣化技術轉化為生物炭的過程中，生產設備會直接影響溫室氣體的排放量，涉及的技術可分為高技朮生產設備和低技朮生產設備。

高技術設備需同時符合四項條件，包括：氣體控制與回收機制；熱能回收率達 70%以上；裝置污染控制系統；監測生產過程之溫度數據。若全部條件皆符合，則被認定其生產過程中之 CH₄ 與 N₂O 排放可忽略，此時生產階段排放僅計入輔助能源之碳排。

若設備不符合上述條件其一，則視為低技術設備。此情況下，必須根據方法學提供之預設排放因子，將裂解過程中潛在的 CH₄ 與 N₂O 逸散納入排放估算，反映其較高之碳排。以下將分別說明生產階段之排放計算公式。

(3) 應用階段

生物炭的應用階段涵蓋其最終在土壤或其他非土壤應用中，無論是哪種應用，關鍵在於確保生物炭在使用過程中不會被燃燒或氧化，且依 VM0044 規定，生物炭須於生產後一年內應用，以確保其在實際應用前不因自然分解或其他環境因素造成損失，從而維持其碳封存效益。

2. 基線情境

在沒有專案活動介入時，生物質廢棄物將自然分解，並產生溫室氣體排放。根據該方法學敘述，生物質廢棄物通常有兩種結果：

(1) 生物質自然分解後產生 CH₄ 排放

在自然分解過程中，微生物活動於缺氧條件下會促使生物質廢棄物釋放大量 CH₄。根據 IPCC AR5，CH₄ 的 GWP100 約為 CO₂ 的 28 倍，因此對氣候變遷的影響極為顯著。當農業廢棄物、森林殘渣或其他生物質材料遭棄置或自然堆積時，CH₄ 排放幾乎無可避免。

(2) 燃燒生物質將產生 CO₂ 排放

燃燒是另一種常見處理方式，特別是在農業和林業活動中。當生物質被燃燒時，其碳成分會迅速轉化為 CO₂ 釋放到大氣中。

為了確保計算結果的可信度與審慎性，VM0044 採取保守估計原則。生物質廢棄物在基線情境下可能因自然分解或露天燃燒而排放溫室氣體，方法學仍假設這些排放「不存在」，即設定基線排放量為零。如此一來，雖然專案實際可避免的排放量高於估算值，但在計算基線排放減去專案排放時，由於基線為零，整體減排量反而被低估。此種做法反映了一種謹慎原則——避免高估專案效益，從而提升 VCUs 的真實性與市場公信力。

3. 外加性

- (1) 活動法 (Activity Method)：專案只要將生物質廢棄物轉化為生物炭，即屬於正面清單 (positive list) 範圍。正面清單的原則是，全球用於生物炭生產的生物質廢棄物總量，僅占全球生物質廢棄物不到 5%。這表示該技術尚未普遍，因而具備外加性。
- (2) 核心判斷基礎：本方法學基於產業現況、生物炭產量遠低於潛在產能，適用生物質廢棄物為原料生產生物炭的專案均判定具備外加性。

(3) 頓外要求：專案還必須證明其活動滿足上述方法學規定，並且必須能排除其他用途上的競爭與政策壓力。

4. 溫室氣體移除之量化

(1) 基線排放量

A. 原料階段

在未實施本專案的情境下，生物質廢棄物預期將被棄置於環境中而腐爛，或被燃燒於專案邊界內用作非生物炭生產之能源用途。根據本方法學，於原料來源階段的保守情境（ $PE_{SS,y}$ ）下，其基線排放預設為零。此外，在基線情境中並無生物炭之產製與應用，故不計入此階段的任何溫室氣體排放或移除量。

B. 生產階段

生產階段計算公式如下：

$$ER_{PS,y} = \sum_t \left(\left(\sum_k CC_{t,k,y} \times \frac{44}{12} \right) - \left(\sum_p PE_{PS,t,p,y} \right) \right)$$

式 1

y = 當年度。

t = 不同的生物炭類型（來源不同原料、不同製程等）。

k = 不同的應用方式（應用於土壤或建材）。

$ER_{PS,y}$ = 生產階段的溫室氣體移除量。

$CC_{t,k,y}$ = 第 y 年，應用於 k 類用途的 t 類生物炭，其乾重基準下的有機碳含量（單位：噸）。

$PE_{PS,t,p,y}$ = 生產生物炭 t 於設備 p 在年 y 的專案排放量 (tCO_2e)。

$\frac{44}{12}$ = 用以將乾重基準下的有機碳量換算為等量的 tCO_2e ，依據碳與 CO_2 分子量之比例。

方法學中，生物炭生產階段的排放依據設備區分為高技術與低技術兩種設備情境。此一分類直接影響排放計算範圍與專案，特別是在 CH_4 與 N_2O 逸散的處理上。

a. 高技術設備

有機碳含量計算

$$CC_{t,k,y} = \sum_p (M_{t,k,p,y} \times F_{cp,t,p} \times PR_{de,k})$$

式 2

$M_{t,k,p,y}$ = 第 y 年，在 p 生產設備所生產、用於 k 類應用的 t 類生物炭之乾重質量 (tCO₂e)。

$F_{cp,t,p}$ = 在生產設備中，每噸 t 類生物炭之乾重基準有機碳含量（表 9）。

$PR_{de,k}$ = 用於調整生物炭在 k 類應用中因腐化而造成的持久性因子（

表 10）。生物炭應用於土壤時，會受自然分解率影響。

表 9 各種原料與生產方式下的生物炭有機碳含量因子值

| 原料種類 | 熱裂解技術 | F_{cp} 值 |
|------------------------------|-------|------------|
| 畜禽糞便 | 熱裂解 | 0.38 ± 49% |
| | 氣化 | 0.09 ± 53% |
| 木材 | 熱裂解 | 0.77 ± 42% |
| | 氣化 | 0.52 ± 52% |
| 草本植物（禾本科植物、草本植物、葉子；不包括稻穀和稻蒿） | 熱裂解 | 0.65 ± 45% |
| 稻殼與稻蒿 | 熱裂解 | 0.49 ± 41% |
| | 氣化 | 0.13 ± 50% |
| 堅果殼、果核和種子硬殼 | 熱裂解 | 0.74 ± 39% |
| | 氣化 | 0.40 ± 52% |
| 生物固體（包括造紙污泥與污水處理污泥） | 熱裂解 | 0.35 ± 40% |
| | 氣化 | 0.07 ± 50% |

表 10 生物炭中有機碳含量因子經過 100 年後仍留存於土壤中的比例值

| 製程溫度 | F_{perm_p} 值 |
|--------------------|----------------|
| 高溫裂解與氣化 (> 600 °C) | 0.89 ± 13% |
| 中溫裂解 (450-600 °C) | 0.80 ± 11% |
| 低溫裂解 (350-450 °C) | 0.65 ± 15% |

排放量計算

$$PE_{PS,p,y} = (P_{ED,p,y} + P_{EP,p,y} + P_{EC,p,y}) \times \frac{\sum_t \sum_k M_{t,k,p,y}}{M_{p,y}}$$
式 3

$P_{EP,p,y}$ = 年度 y 生產設備 p 的生產階段專案排放量 (tCO₂e)

$P_{ED,p,y}$ = 生產設備 p 年度 y 生物質廢棄物預處理所致排放量 (tCO₂e)

$P_{EP,p,y}$ = 生產設備 p 年度 y 生物質廢棄物轉化為生物炭所致排放量 (tCO₂e)

$P_{EC,p,y}$ = 生產設備 p 年度 y 為裂解使用輔助能源所致排放量 (tCO₂e)

$M_{p,y}$ = 第 y 年在生產設備 p 製造的生物炭總乾重質量 (tonnes)

原料預處理排放量

$$P_{ED,p,y} = P_{EDE,p,y} + P_{EDF,p,y}$$
式 4

$P_{ED,p,y}$ = 原料預處理排放量，若能源為再生能源時 $P_{ED,p,y}$ 必須為設為零。

$P_{EDE,p,y}$ = 指為了預處理原料，在生產設備 p、y 年所使用的電網連接電力所產生的排放量 (tCO₂e)。計算方式需依據 CDM TOOL05 標準工具進行。

$P_{EDF,p,y}$ = 指為了預處理原料，在生產設備 p、y 年所燃燒化石燃料產生的排放量 (tCO₂e)。計算方式需依據 CDM TOOL03 標準工具進行。

計算生物炭熱解生產過程中（尤其是主製程，如 CH₄ 等氣體逸散）的溫室氣體排放量。

$$P_{EP,p,y} = 0$$
式 5

$P_{EP,p,y}$ = 第 y 年在生產設備 p 中，將生物質廢棄物轉化為生物炭過程所產生的溫室氣體排放量 (tCO₂e)，高技術設備（有完善尾氣處理與監控），方法學允許把這一項排放直接設為零，表示這部分的碳排放可忽略。

熱裂解過程中輔助能源排放量

$$P_{EC,p,y} = P_{ECE,p,y} + P_{ECF,p,y} \quad \text{式 6}$$

$P_{EC,p,y}$ = 生產設備 p 於第 y 年，為啟動及維持熱解過程輔助能源所產生的排放 (tCO₂e)。

$P_{ECE,p,y}$ = 生產設備 p 於第 y 年，熱解反應器啟動時所用電網產生的碳排放 (tCO₂e)，依 CDM TOOL05 計算。

$P_{ECF,p,y}$ = 生產設備 p 於第 y 年，啟動熱解反應器所燃燒化石燃料產生的碳排放 (tCO₂e)，依 CDM TOOL03 計算。

當需要外部能源來啟動和維持熱裂解反應爐時，必須將其計入專案排放量。若為再生能源時 $P_{EC,p,y}$ 必須設為零。

b. 低技術設備

有機碳含量公式

$$CC_{t,k,y} = \sum_p (M_{t,k,p,y} \times F_{cp,t,p} \times PR_{de,k}) \quad \text{式 7}$$

生產階段專案排放量公式

$$PE_{PS,p,y} = (P_{ED,p,y} + P_{EP,p,y} + P_{EC,p,y}) \times \frac{\sum_t \sum_k M_{t,k,p,y}}{M_{p,y}} \quad \text{式 8}$$

原料預處理排放量

$$P_{ED,p,y} = P_{EDE,p,y} + P_{EDF,p,y} \quad \text{式 9}$$

$P_{EDE,p,y}$ = 指為了預處理原料，在生產設備 p、y 年所使用的電網連接電力所產生的排放量 (tCO₂e)。計算方式需依據 CDM TOOL05 標準工具進行。

$P_{EDF,p,y}$ = 指為了預處理原料，在生產設備 p、y 年所燃燒化石燃料產生的排放量 (tCO₂e)。計算方式需依據 CDM TOOL03 標準工具進行。

低技術設備熱裂解過程排放

$$P_{EP,p,y} = \sum_k \sum_t (F_e \times GWP_{CH_4} \times M_{t,k,p,y}) \quad \text{式 10}$$

$P_{EP,p,y}$ = 生產設備 p 在年度 y 生物質廢棄物轉化為生物炭所致排放量 (tCO₂e)

F_e = 每年每生產一公噸生物炭所產生之 CH₄ 平均排放量 (tCH₄/tonne)，數值請依據 Cornelissen 等人 (2016) 表 3 之對應熱裂解設備型態；若無熱裂解設備型態資料，VM0044 建議使用傳統熱裂解設備預設值 0.049 tCH₄/tonne。

GWP_{CH_4} = CH₄ 全球暖化潛勢，VM0044 規定專案開發者應以 VCS Standard 所指定之 IPCC 最新版本數值為依據，目前最新版本 VCS Standard v4.7 指定 IPCC AR5 建議採用的 100 年期 $GWP_{CH_4} = 28$ 。

$M_{t,k,p,y}$ = 第 y 年，在 p 生產設備所生產、用於 k 類應用的 t 類生物炭之乾重質量 (tCO₂e)。

熱裂解過程中輔助能源排放量。當需要外部能源來啟動和維持熱裂解反應爐時，必須將其計入專案排放量。若為再生能源時 $P_{EC,p,y}$ 必須為零。

$$P_{EC,p,y} = P_{ECE,p,y} + P_{ECF,p,y} \quad \text{式 11}$$

C. 應用階段

$$PE_{AS,y} = \sum_k \sum_t (E_{P,t,k,y} \times E_{ap,t,k,y}) \quad \text{式 12}$$

$PE_{AS,y}$ = 第 y 年應用階段 (如施用於土壤或非土壤) 的溫室氣體排放量 (tCO₂e)。

$EP_{P,t,k,y}$ = 第 y 年應用階段，針對類型 t 生物炭、用途 k 之生物炭處理過程 (如粉碎、研磨、混合、包裝) 所產生的溫室氣體排放 (tCO₂e)。

$E_{ap,t,k,y}$ = 第 y 年應用階段，型 t 生物炭、用途 k 在實際應用 (如施用在田間、或混凝土中) 本身過程中產生的排放 (tCO₂e)。

$$E_{P,k,y} = P_{EPE,k,y} + P_{EPF,k,y} \quad \text{式 13}$$

$E_{P,k,y}$ = 針對用途 k ，生物炭處理所產生的排放量 (tCO₂e)。若無進行生物炭處理，須設為零。

$P_{EPE,k,y}$ = 針對用途 k ，在第 y 年生物炭處理過程所用電網產生的溫室氣體排放 (tCO₂e)。必須依照 CDM TOOL05 有關電力消耗排放的規範計算。

$P_{EPF,k,y}$ = 針對用途 k ，在第 y 年生物炭處理過程所燃燒化石燃料產生的溫室氣體排放 (tCO₂e)。必須依照 CDM TOOL03 有關化石燃料燃燒排放的規範計算。

5. 滴漏排放

滴漏是指因專案活動導致邊界之外的溫室氣體排放增加，依據 VM0044 方法學，在生物炭的使用情境中，滴漏排放主要歸因於生物炭生命週期各階段的運輸排放。由於目前僅允許使用廢棄生質材料進行生物炭生產，因此因「活動轉移 (activity-shifting)」或「生物質資源轉向 (biomass diversion)」所造成的排放視為零。滴漏排放總和的量化如下：

$$LE_y = LE_{as,y} + LE_{bd,y} + LE_{ts,y} + LE_{tap,y} \quad \text{式 14}$$

LE_y = 第 y 年的總滴漏排放量 (tCO₂e)。

$LE_{as,y}$ = 第 y 年因活動遷移造成的滴漏排放 (tCO₂e)。活動遷移滴漏設為零，因為目前程序規定不允許專門種植的生物質用於生物炭生產。

$LE_{bd,y}$ = 第 y 年因「生物質資源轉向」造成的滴漏排放 (tCO₂e)。因所用生物質僅限於本會被燃燒或腐化生物質廢棄物，因此這項滴漏排放可視為可忽略。

$LE_{ts,y}$ = 第 y 年生物質廢棄物由產地運送至生物炭廠過程中的運輸滴漏排放 (tCO₂e)。若運輸距離超過 200 公里，需依 CDM TOOL 12 計算其運輸產生的溫室氣體排放。

$LE_{tap,y}$ = 第 y 年生物炭由生產廠運送至最終應用地點過程中的運輸滴漏排放 (tCO₂e)。同樣地，僅當運輸距離超過 200 公里時須納入計算，應依據 CDM TOOL 12 估算。

$$LE_{TR,m} = \sum_f D_{f,m} \times FR_{f,m} \times EF_{CO_2,f} \times 10^{-6}$$

式 15

本研究使用 CDM TOOL 12 之選項 B：利用預設值法公式，推算運輸碳排放。

$LE_{TR,m}$ = 專案排放/運輸洩漏排放的計算結果，單位是 tCO₂。

Σf = 代表每一筆運輸活動，都要分別計算，然後相加。

$D_{f,m}$ = 來回距離，例如 A 至 B 單程為 100 km，則 $D_{f,m} = 200$ km。

$FR_{f,m}$ = 該活動實際運載的總貨重 (ton)。

$EF_{CO_2,f}$ = 預設 CO₂ 排放因子，由 CDM 預設決定 (

表 11)。

10^{-6} = 因為排放因子單位是 g CO₂/噸·公里，為了換算成 tCO₂e，需乘以 10^{-6} 。

表 11 CDM TOOL 12 預設車輛排放因子

| 車輛類型 | 排放因子 (g CO ₂ / ton Km) |
|------|-----------------------------------|
| 輕型車輛 | 245 |
| 重型車輛 | 129 |

6. 淨溫室氣體減少排放與移除之量化

來源階段之減少排放公式

此階段為零，因原料來源階段不被視為能實際減碳的來源，是方法學用來保守對比、避免過度主張碳信用效益的設計。

$$ER_{SS,y} = BE_{SS,y} - PE_{SS,y}$$

式 16

$ER_{SS,y}$ = 第 y 年原料來源階段的溫室氣體減量量 (tCO₂e)。

$BE_{SS,y}$ = 第 y 年原料來源階段的基線排放量 (tCO₂e)，採最保守假設，預設值為零。

$BE_{SS,y}$ = 第 y 年原料來源階段的專案排放量 (tCO₂e)，同樣保守假設為零（因生物質廢棄物被視為再生生質原料）。

總淨溫室氣體減少排放與移除之量化

$$ER_y = ER_{SS,y} + ER_{PS,y} - PE_{AS,y} - LE_y \quad \text{式 17}$$

7. 監測與報告

在專案實行過程中，監測是確保專案活動能夠有效減排的關鍵措施之一。監測系統需涵蓋專案的各個階段，包括原料來源、生產過程以及最終應用。

(二) Puro.earth Biochar Methodology

以下翻譯並引用自 Puro.earth Biochar Methodology 之計算式的部份。本部份盡量保留原始計算式，而針對本研究設定之臺灣情境的計算為呈現的簡便化而對代稱稍有改動，此改動於結果與討論章節中說明。

1. 符合資格之活動類型

根據 Puro.earth 定義可申請該方法者是能夠生產具有長期穩定性之生物炭，對於該方法學所要求的生物炭穩定性可以從其特性估算，特別是有機碳的莫耳氫碳比 ($H/Corg$ ratio)。 $H/Corg$ ratio 低於 0.2 的材料被認為在環境中幾乎不會分解。

2. 符合方法學之活動要求

(1) 生物炭必須應用於能保持其碳儲存能力的用途。

例如生物炭可用於溫室基質、地表水障礙、動物飼料添加劑、廢水處理、隔熱材料、垃圾填埋場或礦場吸收劑、土壤添加劑等。而生物炭不可被用作燃料或還原劑等會破壞其碳儲存功能的用途。

(2) 生物炭必須來自永續的生物質

生物炭應來自永續來源之生物質或農業廢棄物、生物可分解廢棄物、都市木材廢棄物或食物廢棄物。關於生物質類型的詳細列表，可以參考 IPCC 附錄 4「通過生物炭修正估算礦質土壤有機碳儲量變化方法」的表 4 AP.1，以及 EBC 的正面清單。

(3) 淨負碳排放要求

生產者必須透過 LCA 或碳足跡分析來證明其淨負碳排放，即生產過程中所移除之 CO_2 超過其排放。LCA 需包含生物質生產與供應、生物炭生產過程及其應用過程中的排放數據，並對不同階段的排放和各種溫室氣體進行分解分析。該評估需依據 ISO 14040/44 標準和本方法學第 3、4 節中的範疇進行。

(4) 使用化石燃料

在生物炭生產過程中，允許使用化石燃料（煤、石油、天然氣）作為點火、預熱或熱裂解設備的加熱燃料。但不允許將化石燃料與生物質在同一反應室中共同燃燒，因為這樣會使化石碳混入生物炭產品中。這些化石燃料的使用所帶來的溫室氣體排放（包括燃料供應、燃燒和逸散排放）必須被納入 LCA 中。

(5) CH₄ 排放控制

生物炭生產過程中的 syngas 必須經過燃燒或回收處理，以消除或使 CH₄ 排放量微乎其微。Bio-oil 和 syngas 可以儲存，用於後續的再生能源或材料用途。

(6) 生物炭穩定性要求

產生的生物炭的有機氫碳比必須低於 0.7。這個比值是衡量生物炭碳化程度及其穩定性的指標。若該值超過 0.7，表示該材料可能是非熱裂解產物或是熱裂解過程中的缺陷產物。

(7) 產品品質和合規性

產生的生物炭必須符合使用所在司法區的產品品質要求，特別是針對特定應用的品質標準。例如，作為土壤添加劑的生物炭，可能需要符合關於重金屬、芳香烴等有機污染物含量的法律要求。如果當地無此類要求，生物炭的品質需參照自願品質標準，如 IBI 計劃或 EBC 指南。其他標準需經 Puro.earth 認可，若偏離這些品質標準，碳移除供應商需提出理由並獲得發證機構批准，並將這些資訊公開（例如通過網站、產品資訊單、向終端用戶提供的資料等）。

(8) 安全工作環境及生產措施

必須採取措施來確保安全的工作環境、清潔生產原則，以及生物炭的安全處理和運輸，防止火災、粉塵和健康危害。這些安全措施包括提供材料安全數據表、對生物炭進行後期淬火和冷卻、以及配備適當的煙氣處理系統。

(9) 生產設備的合格性審核

生產設備的合格性將由生產設備審核來確定。

3. 生產設備審核要求

(1) 審核生產設備

生產設備審核員根據 Puro Standard 的通用規則和此方法學中的特定要求，檢查生產設備是否符合規範，並審查碳移除供應商提供的證據與證書。

(2) 環境與社會保障

碳移除供應商必須能夠證明環境和社會保障，並確保生產設備的活動對周圍自然環境或當地社區不會造成重大損害。可以透過以下方式任一或多種方式進行：

A. 環境影響評估（Environmental Impact Assessment, EIA）

- B. 環境許可證
- C. 其他由發證機構批准的文件，分析和管理環境和社會影響
- D. 若適用，生產設備活動應在當地社區和其他受影響方知情同意的情況下進行，並制定政策來處理潛在的申訴問題。

(3) 外加性

碳移除供應商必須證明專案具有外加性，即 CO₂ 的移除是由碳金融資助所促成。即使該專案得到非碳金融（如政府補助或其他資金）支援，只要需要投資、承擔風險或開發人力資本，仍可被視為具有外加性。為此，供應商需提供完整的專案財務報告和基於特定專案基線的反事實分析（counterfactual analysis），並且基線必須保守且定期更新。此外，還需證明該專案不受現行法律、法規或其他約束性義務的要求。

4. LCA

CO₂ 移除供應商需為生物炭活動提供 LCA。該評估應遵循 ISO 14040/44 中定義的一般原則，並依照本方法學第 3 節介紹的系統邊界，第 4 節介紹的生物質生產與供應、生物炭生產、生物炭使用的方法。

(1) 系統邊界

系統邊界（如圖 10、圖 11）應設為從搖籃到墳墓完整過程，並應包括生物質生產和供應、生物質轉化為生物炭、生物炭的分配和使用過程中的排放。LCA 必須包含分解的排放數據，顯示在不同階段和不同溫室氣體的排放情況。

(2) 基線情境

專案活動中默認基線情境設為零，這是一個保守假設，因為未考慮到來自糞便分解或生物質廢棄物燃燒所產生的 CH₄ 排放。如果供應商能夠提供充分的科學證據，並得到 Puro.Earth 的接受，則可以提交非零基線排放的聲明。

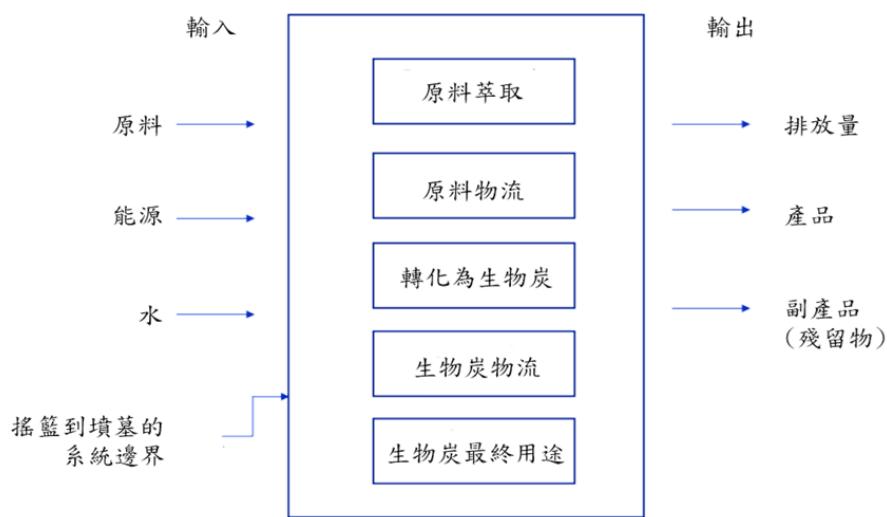
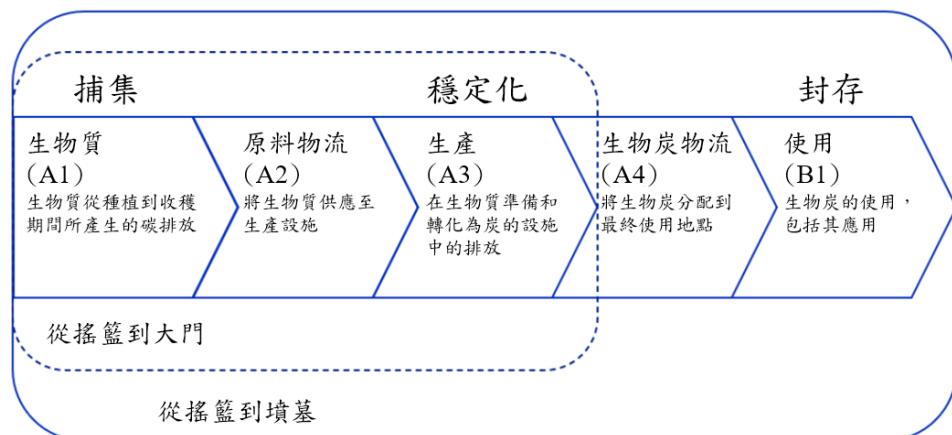


圖 10 生物炭活動 LCA 的整體系統邊界 (Puro.earth V3, 2022)

$$E_{biomass} = A(1) \text{ 原料收集} + (A2) \text{ 原料物流}$$

$$E_{production} = (A3) \text{ 熱化學轉化}$$

$$E_{use} = (A4) \text{ 生物炭物流} + (B1) \text{ 生物炭終端用途}$$



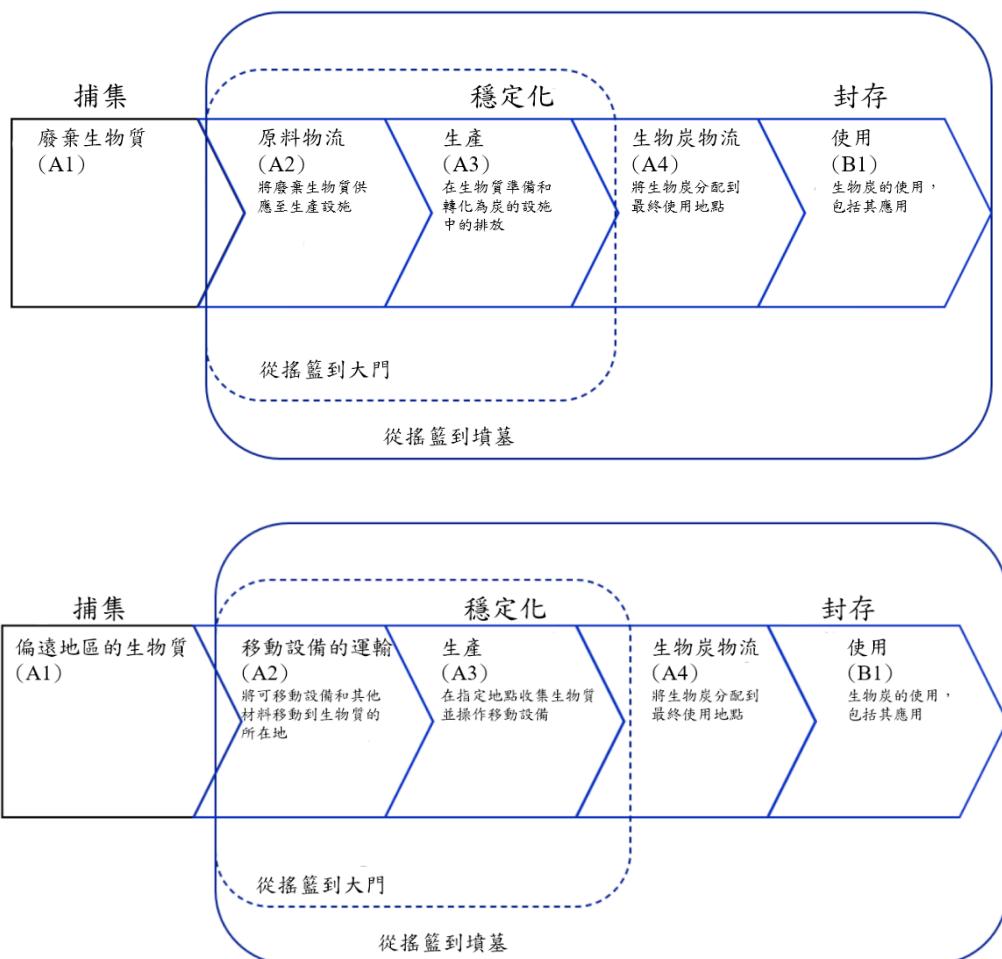


圖 11 生物炭活動 LCA 的整體系統邊界 (Puro.earth V3, 2022)

這些條款定義了 CORCs 的生產點及其生命週期排放的計算方法，確保供應商對生物炭生產和使用過程中的環境影響進行透明的報告。

1. CO₂移除量的計算方法

這部分是計算生物炭在生產活動內所產生的 CORCs 的數量，為針對給定產量的生物炭。首先介紹總體公式及其參數，接著總結每個專案的詳細計算方法。

(1) 100 年期內淨 CO₂ 移除總體公式

$$CORCs = E_{stored} - E_{biomass} - E_{production} - E_{use}$$

式 18

- A. 第一項 E_{stored} 描述生物炭產量在 100 年時限內封存的 CO₂ 量。
- B. 第二項 $E_{biomass}$ 描述了從生物質供應到生產設備的生命週期溫室氣體排放，

包括直接土地使用變更的影響。

- C. 第三項 $E_{productio}$ 描述了在生產設備中，將生物質轉化為生物炭過程中的生命週期溫室氣體排放。
- D. 最後一項 E_{use} 描述了生物炭分配到最終使用點的過程中，所產生的生命週期溫室氣體排放。

上述公式中，所有的專案數值及產生的證書數量都是正值。供應的 CORC 數量等於生物炭封存的 CO₂ 量減去在整個生產、供應和使用過程中的生命週期排放量。

(2) E_{stored}

該專案 E_{stored} 基於 Woolf 等人（2021）¹ 的方法學計算，這一方法提供了針對不同時間範圍（TH）內的生物炭碳封存量估算，特別是應用於土壤中的生物炭，考慮到土壤溫度的影響。對於本方法學，時間範圍設為 100 年。

由於氣候不同，100 年期內的生物炭碳封存量會隨著不同的土壤溫度（TS）而變化，因此需要根據生物炭分配和使用地區的代表性平均年土壤溫度來應用此方法。全球平均農地年溫度約為 14.9°C，但在不同地區之間會變化 5°C 到 25°C。

初期應用於非土壤用途的生物炭，其分解速率可能較慢。然而目前尚無經同儕審查的方法可用於估算此類產品的長期碳匯效益。因此，即使是用於非土壤應用，現行針對土壤中生物炭分解的估算方法仍被採用，並可視為一種保守估計。關於生物炭碳封存（ E_{stored} ）可以透過以下公式計算：

$$E_{stored} = Q_{biochar} \times C_{org} \times F_p^{TH, TS} \times \frac{44}{12} \quad \text{式 19}$$

這個公式包含了三個參數和一個轉換因數：

- A. $Q_{biochar}$ ：表示報告期內生產的生物炭量，單位是乾公噸（dry metric tonnes）。
應注意排除任何水分，因為水分會導致實際碳封存量的高估。
- B. C_{org} ：指生物炭中有機碳的含量，表示為有機碳的乾重除以生物炭的乾重。這

¹ Woolf D, Lehmann J, Ogle S, et al (2021) Greenhouse Gas Inventory Model for Biochar Additions to Soil. Environ Sci Technol. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c00..2425>

個值由實驗室分析確定，且採樣方法必須具有代表性。若生物炭是由多種不同生物質生產，則應分批進行實驗室分析。

- C. $F_p^{TH,Ts}$ ：代表生物炭有機碳在特定時間範圍 (TH) 和特定土壤溫度 (T_s) 下的持久性係數（即碳穩定性），以百分比 (%) 表示。該係數是根據生物炭的 H/C_{org} 莫耳比值來計算，且遵循以下線性關係：

$$F_p^{TH,Ts} = c + m \times \frac{H}{C_{org}}$$

式 20

- D. H/C_{org} 莫耳比是由實驗室分析得到，計算方式為：將氫質量含量除以有機碳質量含量，並乘以碳和氫的莫耳質量比。即：

$$H/C_{org} (\text{molar}) = \frac{m_H(\%)}{m_C(\%)} \times \frac{M_C (\text{g mol}^{-1})}{M_H (\text{g mol}^{-1})} = \frac{m_H(\%)}{m_C(\%)} \times \frac{12}{1.0}$$

式 21

在公式中， c 和 m 是時間範圍 (TH) 和土壤溫度 (T_s) 的函數。表 12 提供了在 100 年期 (TH) 和不同土壤溫度 (T_s) 下的兩個迴歸係數 (c 和 m)。生物炭生產者應考慮生物炭使用的主要地區來選擇適當的係數。如果無法明確定義主要使用地區，則可使用全球平均土壤溫度 14.9°C 作為預設值。

表 12 在不同土壤溫度 T_s 下 100 年時間範圍 TH 估計生物炭穩定性的迴歸係數。可以使用 CO2 移除供應商提供的 Puro 工具進行精確的溫度選擇。

| 土壤溫度 T_s | c | m |
|----------------------|------|-------|
| 5°C | 1.13 | -0.46 |
| 10°C | 1.10 | -0.59 |
| 15°C | 1.04 | -0.64 |
| 20°C | 1.01 | -0.65 |
| 25°C | 0.98 | -0.66 |
| 14.9°C | 1.04 | -0.64 |

資料來源：Biochar Methodology Edition 2022 V3

(3) $E_{biomass}$

$E_{biomass}$ 應根據生物質生產和運輸至生物炭生產現場的 LCA 進行計算。生物質生產和供應的 LCA 通常包括以下四個部分：

- A. 生物質生產：應包括所有涉及生物質種植和收穫過程的活動中產生的溫室氣體排放，如機械設備的使用與燃料消耗、肥料生產、肥料使用後的土壤排放，以及機械的製造和處理等。
- B. 直接土地利用變更：此項代表由於土地覆蓋或土地管理變更所產生的排放。例如，與造林相關的 CO₂ 和其他溫室氣體的排放，也包括森林或農業殘餘物時地上和地下碳庫的損失。通常，直接土地利用變更的排放可設定為零，但需明確說明基準情況以進行合理的說明。
- C. 生物質運輸：應包括從收穫地到生物炭生產地的運輸過程中的排放，理想情況下應包括燃料排放、運輸工具和道路基礎設備的排放。
- D. 移動單位運輸：當使用移動碳化設備或類似設備時，應計算將該設備移動到生物質位置所產生的排放。

(4) $E_{production}$

$E_{production}$ 應基於生物炭生產過程的 LCA 進行計算，應包括從生物質轉化為生物炭的所有活動產生的溫室氣體排放。

相關的活動可能包括：

- A. 生物質在現場的處理（如運輸或輸送）。
- B. 生物質的乾燥、粉碎、篩選。
- C. 热裂解設備及後續設備的運行（如燃燒 syngas 和 Bio-oil 的燃燒室、廢氣處理系統），或氣化反應器及後處理設備的運行。
- D. 生物炭的冷卻及其他後處理操作（如包裝、活化）。
- E. 生物炭在現場的處理（如運輸或輸送）。
- F. 移動碳化設備的燃料消耗，包括操作移動設備時，生物質的收集與處理，以及運輸燃料到操作現場。

這些活動的生命週期各個階段應納入計算。例如，熱裂解設備的操作應包括反應器的製造與安裝，運行所需的材料與能量輸入，反應器煙囪的直接空氣排放，以及反應器的維護與處理。生物質乾燥和粉碎的過程同樣應包括設備的製造與處理，運行設備所需的能量消耗（如電力或外部熱能），以及運行和維護過程中的其他耗材。

關於熱裂解過程的副產品處理如下說明：

- A. 根據熱裂解設備的配置，可能會產生其他副產品，如熱能、電力或 Bio-oil。大多數情況下，從氣體燃燒產生的一部分熱能會用於維持熱裂解反應及乾燥生
物質，這是熱裂解過程的內部能量流動，無需納入 LCA。
- B. 但是，任何超出熱裂解過程需求的多餘熱能、電力或 Bio-oil 會引發 LCA 中的
多功能性問題。根據傳統的 LCA，這可以通過多種方法處理，主要包括分配
或替代。

(5) E_{use}

E_{use} 應根據已知的生物炭用途進行 LCA，評估範圍應涵蓋至少生物炭從運輸、
處理至被使用於不可分離的礦物基質（如土壤或混凝土）之前的所有溫室氣體排放。

2. CO₂ 移除供應商需要提供之證據

生產設備產出的生物炭一旦通過協力廠商審核員對生物炭特定方法學的驗證，
將被確定為有資格發行 CORCs。此驗證過程稱為生產設備審核，旨在確保相關的
CO₂ 移除確實已經發生，並且相關的環境和社會保障措施已到位，CO₂ 移除符合方
法學中對永久性的定義。為使生物炭生產活動符合發行 CORCs 的資格，CO₂ 移除
供應商（即生物炭生產者）需提供以下證據：

(1) 生物質的生產與供應

- A. 必須保存生物質原料來源及其永續性的證明，這些證據應提交給 Puro 並可供
產出審核使用。
- B. 必須提供生物質生產與供應的 LCA 數據，並記錄在案。特別是需要以分解的
形式展示各個生命週期階段對氣候變遷的影響，以及主要溫室氣體的貢獻。

3. LCA

依據 ISO 14040:2006《環境管理—生命週期評估—原則與架構》所建立之評
估架構，主要因應本研究所依循《Puro.earth Biochar Methodology Edition 2022 V3》
明確規範—LCA 應遵循 ISO 14040/44 的一般原則，並依據本方法學所定義之範疇
進行。因此，本研究於設計 LCA 評估流程時，全面對應 ISO 14040/44 之原則與
架構，確保結果符合生物炭方法學規範及國際標準，並滿足第三方審查所要求。

1. 目標與範疇

(1) 目標

估算每噸乾重生物炭在穩定儲碳期 100 年內相當於移除多少 tCO₂e，並進一步推估可取得之 CORC。

(2) 範疇

本研究所建構之 LCA 模型，採用搖籃到墳墓之系統界限設定，涵蓋從原料取得、生物炭生產、運輸及最終廢棄階段（圖 12），完整界定生物炭產品生命週期中涉及之碳排放、減排與移除相關參數、設備配置與流程範疇。

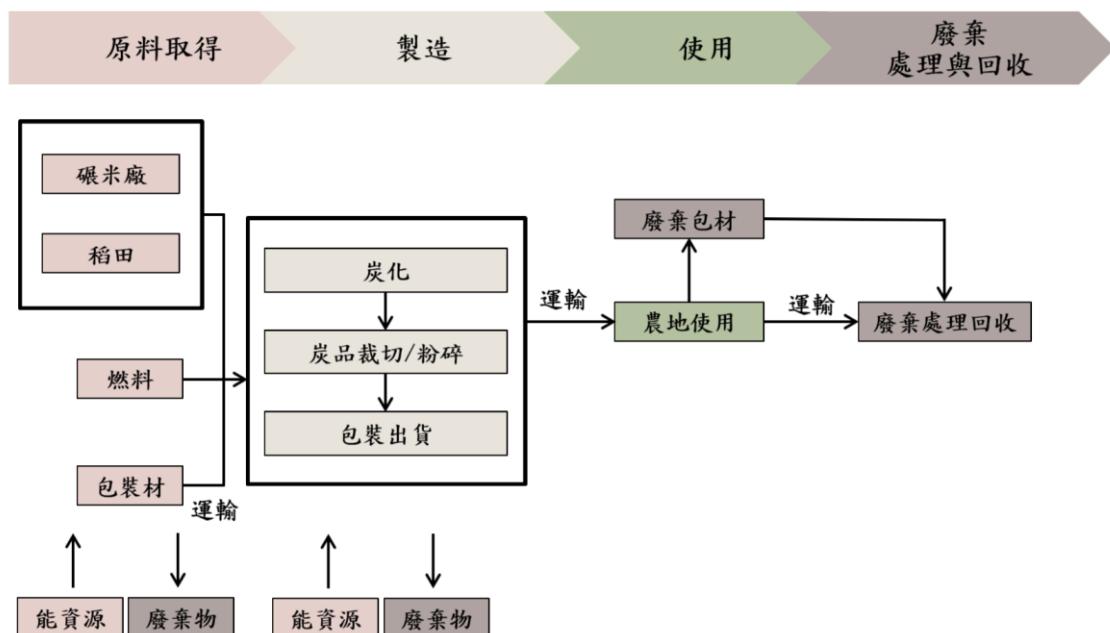


圖 12 本研究設定之系統邊界

第四章 研究結果與討論

第一節 碳匯計算

(一) VM0044

1. 專案運作模式

(1) 本專案旨在將稻殼、稻蒿從未妥善處理之做法，轉變為生產與應用生物炭。透過導入高、低技術兩種熱裂解情境與下方步驟實現淨溫室氣體移除：

- A. 稻蒿在田間內風乾或晾乾，稻殼從碾米廠收集，以永續收集為準則，移除量不得超過總量 50% (表 15)。
- B. 生物炭生產後，於一年內施用於 10 公分深的土壤中。

2. 專案邊界

(1) 初始生物質廢棄物的來源

本研究依據 113 年度農業部統計（表 13），臺灣各地區稻穀年產量分別為北部 190,492 噸、中部 779,340 噸、南部 438,546 噸、東部 134,564 噸。

- A. 稻殼產量計算：本研究採用農業部建議以稻穀產量之兩成計算。
- B. 稻蒿產量計算：臺灣地區水稻之蒿穀比例約在 0.9 至 1.2 之間，本研究採用農業部建議以 1.0 計算。
- C. 原料乾重換算：行政院原子能委員會委託國立東華大學執行之研究報告《東臺灣生質能源資源循環型利用之發展潛能評估與案例分析》(蘇美惠, 2016)，其中針對花蓮縣 2014 年各鄉鎮稻作產量及農業廢棄物產生量進行系統化調查與估算。由該文獻可得知稻殼與稻蒿乾重皆係由田間產量（含水狀態）乘以乾重轉換係數推估而得，分別為稻殼 95% 及稻蒿 90%。此比值代表在未進一步乾燥處理的田間收穫後，稻殼約含 5% 水分，而稻蒿約含 10% 水分。此種固定比例推估雖未反映區域間氣候與品種差異，但已可作為本研究在估算稻作副產物乾重量與進行碳資源化潛力評估時之依據。

表 13 113 年臺灣各地區稻穀年產量（單位：公噸/年）

| 地區 | 田間產量 | | | 乾重 | |
|----|--------------|------------|--------------|------------|--------------|
| | 稻穀 | 稻殼 | 稻蒿 | 稻殼 | 稻蒿 |
| 北部 | 190,492.25 | 38,098.45 | 190,492.25 | 36,193.53 | 171,443.03 |
| 中部 | 779,340.11 | 155,868.02 | 779,340.11 | 148,074.62 | 701,406.10 |
| 南部 | 438,546.26 | 87,709.25 | 438,546.26 | 83,323.79 | 394,691.63 |
| 東部 | 134,563.71 | 26,912.74 | 134,563.71 | 25,567.11 | 121,107.34 |
| 總計 | 1,542,942.34 | 308,588.47 | 1,542,942.34 | 293,159.04 | 1,388,648.10 |

資料來源：農業部 113 年度農業廢棄物排放量歷年表

D. 生物質於熱裂解過程，產生之所有產物包括固體、氣體與液體，根據不同的熱裂解技術和原物料，產物組成分布也會有所不同。表 14 為稻殼、稻蒿經熱裂解製程所得產物產率分佈。根據 VM0044 方法學規定，所有與生物炭相關的溫室氣體減排和碳移除計算，均須以生物炭乾重為基礎。

表 14 低技術熱裂解獲得之產物比率

| 生物質 | 操作條件 | | | 產物產率 (wt%) | | | 資料來源 |
|-----|------------|---------------|---------------------------------|------------|----|----|---------------------|
| | 溫度 (°C) | 反應時間 (min) | 升溫速率 (°C min ⁻¹) | 固體 | 液體 | 氣體 | |
| 稻殼 | 500 | 120 | 5 | 35 | 37 | 24 | Vieira et al., 2020 |
| 稻蒿 | 450 | 60 | 20 | 33 | 28 | 39 | Wang et al., 2020 |

表 15 113 年臺灣各地區稻殼稻蒿利用上限比率（單位：公噸/年）

| 地區 | 可使用上限量 | |
|----|------------|------------|
| | 稻殼 | 稻蒿 |
| 北部 | 18,096.76 | 85,721.51 |
| 中部 | 74,037.31 | 350,703.05 |
| 南部 | 41,661.89 | 197,345.82 |
| 東部 | 12,783.55 | 60,553.67 |
| 總計 | 146,580.52 | 694,324.05 |

資料來源：農業部 113 年度農業廢棄物排放量歷年表

(2) 透過合格的熱化學技術處理生物質廢棄物以生產生物炭

- A. 高技術：PYREG PX 500 (圖 8)，一款德國製高科技碳化系統。
- B. 低技術：稻殼熱裂解設備參考 Vieira et al. (2020) 利用固定床反應器優化稻殼生物炭產率之方法進行；稻蒿熱裂解設備參考 Wang et al. (2020) 針對農林與水生生物質的熱裂解行為研究。

(3) 生物炭最終應用在生產後的一年內用於土壤改良。

3. 基線情境

根據農業部歷年的農業廢棄物排放量調查(圖 13)，可以得出在基線情境下，臺灣農民處置大部分稻蒿時習慣留置田地分解，而稻殼會被當成薪材、燃料或禽畜舍墊料。

民國 113 年(資料時期)

農業廢棄物排放量

單位：公噸

| | 產生量 (a) | 妥善處理量 | | | | | | | | | | 備註 | | |
|-------------|------------|-----------|------------|------------|------------------------------|--------|------------|-----------|-------------|-----------|-----------|----------|---------|--------|
| | | 總計 (b) | 就地翻耕 掩埋 | 作物栽培 覆蓋 | 焚燒、掩 埋(含畜糞、死畜畜 禽主要為掩埋) | 倉庫墊料 | 育苗栽培 介質 | 堆肥 | 飼料或飼 料原料 | 禽畜舍墊 料 | 薪材、燃 料 | 資源 回收 | | |
| 總計 | 4,994,171 | 4,994,164 | 1,791,734 | 122,617 | 26,900 | 30,000 | 86,998 | 2,414,021 | 68,898 | 129,607 | 126,521 | 20,210 | 132,446 | 44,213 |
| 農業廢棄物(生物性) | 4,896,917 | 4,896,917 | 1,727,904 | 122,617 | 11,891 | 30,000 | 86,998 | 2,414,013 | 68,898 | 129,607 | 126,521 | 2,014 | 132,446 | 44,008 |
| 農產廢棄物 | 2,403,646 | 2,403,646 | 1,727,904 | 122,617 | 7,531 | 30,000 | 67,660 | 151,678 | 8,332 | 129,607 | 126,521 | - | - | 31,796 |
| 稻殼 | 308,588 | 308,588 | - | - | - | 2,777 | 18,207 | 8,640 | 8,332 | 129,607 | 126,521 | - | - | 14,504 |
| 稻蒿 | 1,542,943 | 1,542,943 | 1,317,461 | 122,617 | 7,531 | 27,223 | 25,086 | 25,733 | - | - | - | - | - | 17,292 |
| 廢棄菇包 | 141,672 | 141,672 | - | - | - | - | 24,367 | 117,305 | - | - | - | - | - | - |
| 果樹枝條 | 244,469 | 244,469 | 244,469 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 竹筍園剩餘殘體 | 165,974 | 165,974 | 165,974 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 漁產廢棄物 | 96,690 | 96,690 | - | - | - | - | 19,338 | 12,483 | 55,200 | - | - | - | - | 9,669 |
| 牡蠣殼 | 96,690 | 96,690 | - | - | - | - | 19,338 | 12,483 | 55,200 | - | - | - | - | 9,669 |
| 畜產廢棄物 | 2,370,796 | 2,370,796 | - | - | 3,662 | - | - | 2,234,688 | - | - | - | - | 132,446 | - |
| 禽畜糞 | 2,232,288 | 2,232,288 | - | - | - | - | - | 2,232,288 | - | - | - | - | - | - |
| 畜禽屠宰後廢棄物 | 91,042 | 91,042 | - | - | 3,396 | - | - | - | - | - | - | - | 87,646 | - |
| 死廢畜禽 | 47,466 | 47,466 | - | - | 266 | - | - | 2,400 | - | - | - | - | 44,800 | - |
| 批發市場廢棄物 | 25,278 | 25,278 | - | - | 698 | - | - | 14,657 | 5,366 | - | - | 2,014 | - | 2,543 |
| 果菜殘渣 | 20,707 | 20,707 | - | - | 667 | - | - | 14,657 | 5,366 | - | - | - | - | 17 |
| 花卉殘渣 | 2,557 | 2,557 | - | - | 31 | - | - | - | - | - | - | - | - | 2,526 |
| 漁產殘渣 | 2,014 | 2,014 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 2,014 | - | - |
| 食品加工廢棄物 | 507 | 507 | - | - | - | - | - | 507 | - | - | - | - | - | - |
| 農業廢棄物(非生物性) | 97,254 | 97,248 | 63,830 | - | 15,009 | - | - | 8 | - | - | - | 18,196 | - | 205 |

圖 13 2024 年臺灣農業廢棄物排放

4. 外加性

(1) 活動法與正面清單

本專案採用的生物質廢棄物製作生物炭行為，明確在 VM0044 方法學中列為正面清單活動，且目前全球生物質廢棄物轉化為生物炭的滲透率遠低於 5%標準門檻，據統計，全球每年實際生物炭生產僅占可用生物質廢棄物的 0.06%，因此本專案屬於較少見的新興減碳途徑。

(2) 規範性盈餘

本專案在現行法規下，未有法律、政策或法規強制要求本專案必須執行生物炭生產與應用，本專案的推動明顯超出法規現有要求，因此達到規範性盈餘的標準。

5. 基線排放量

(1) 原料階段

VM0044 對於基線情境的排放採取了保守的假設，即基線排放為零，因此本研究假設的基線情境排放量設為零。

(2) 生產階段

在生產階段的基線情境中，沒有為專案活動生產生物炭，因此不考慮任何溫室氣體移除或相關排放。

(3) 應用階段

在應用階段的基線情境中，由於沒有生產生物炭，因此不考慮任何溫室氣體移除或相關排放。

6. 專案排放量

(1) 原料階段：方法學規定，如果原料為生物質廢棄物。來源階段排放可設為零。

本研究之探討原料來自於農業廢棄物，不會用於其他用途，因此本階段排放為零。

(2) 生產階段：本研究於生產階段之專案排放計算，區分為低技術與高技術生產設備兩類情境。

A. 步驟一：估算生物炭之有機碳含量。

先推估其乾重。本研究以農業廢棄物之重量乘以固體產物產率百分比，作為生物炭乾重的估計方式。為進一步計算生物炭中所含的有機碳量，須先針對

稻殼與稻蒿經熱裂解後所產生之生物炭乾重進行計算（表 16）。根據 IPCC (2019) 表 4AP.1 所示，稻殼與稻蒿經熱裂解所得生物炭之有機碳比例 $F_{Cp,t,p}$ 為 49%。根據 IPCC (2019) 與 Woolf et al. (2021) 所訂定之保守預設值，中溫熱裂解所產生之生物炭，其碳穩定性係數 $PR_{de,k}$ 為 80%。

表 16 稻殼稻蒿轉化為生物炭之乾重（單位：公噸）

| 地區 | 原料 | | 生物炭 | |
|----|------------|------------|-----------|------------|
| | 稻殼 | 稻蒿 | 稻殼 | 稻蒿 |
| 北部 | 18,096.76 | 85,721.51 | 6,333.79 | 28,288.06 |
| 中部 | 74,037.31 | 350,703.05 | 25,913.06 | 115,731.99 |
| 南部 | 41,661.89 | 197,345.82 | 14,581.62 | 65,124.08 |
| 東部 | 12,783.55 | 60,553.67 | 4,474.29 | 19,982.75 |
| 總計 | 146,580.52 | 694,324.05 | 51,302.76 | 229,126.89 |

藉由 VM0044 公式及前述章節之參數進行計算，得出稻殼所產生之生物炭其有機碳含量為北部地區 2,482.85 噸；中部地區 10,157.92 噸；南部地區 2,858.00 噸；東部地區 1,753.9 噸。稻蒿所產生之生物炭其有機碳含量為北部地區 11,088.92 噸；中部地區 45,366.94 噸；南部地區 25,528.64 噸；東部地區 7,833.24 噸。稻殼加上稻蒿之有機碳含量 $\sum_k CC_{t,k,y}$ 總共為 107,070.42 噸。

B. 步驟二：估算專案排放量

a. 高技術生產設備

在滿足高技術生產設備的資格條件下，本研究使用再生能源，預處理階段 $P_{ED,p,y}$ 可設為零排放。高技術生產設備排出的 CH₄、CO、VOCs 等非 CO₂ 氣體完全被控制在極低排放，對總溫室氣體排放量可忽略不計， $P_{EP,p,y}$ 可設為零排放。熱裂解過程使用電力之排放量為 30538.87 tCO₂e。生產階段溫室氣體排放量計算總合為 30538.87 tCO₂e。高技術設備生產階段的溫室氣體移除量為 362052.68 tCO₂e。

b. 低技術生產設備

本研究假設不須對原料進行預處理，僅風乾或日曬，預處理階段 $P_{ED,p,y}$ 可設為零排放。低技術生產設備熱裂解過程 $P_{EP,p,y}$ 排放量為。熱裂解過程使用再生能源，可設為零排放。生產階段溫室氣體排放量計算總合為 75410.90 tCO₂e。低技術設備生產階段的溫室氣體移除量為 245690.93 tCO₂e。

(3) 應用階段：本研究將應用階段之溫室氣體排放定義為生物炭自生產設備運送至最終施用地點，並假設生物炭是以人工方式施用於農地，因此在施用階段不會燃燒化石燃料，也不會消耗電力， $PE_{AS,y}$ 可設為零。

7. 漏漏

本研究假設一燒炭基地只有一輛大型貨車，每個送貨地點皆是由燒炭基地出發為運輸活動（表 17），有三個地區單趟來回超過 200Km，需要計算進洩漏排放，以 CDM TOOL 12 公式計算運輸碳排放結果顯示，各地原料到燒炭基地運輸碳排放為 6,597.55 tCO₂e；燒炭基地到各地農地運輸碳排放為 235.15 tCO₂e。洩漏階段總排放量為 6832.70 tCO₂e。

表 17 運輸活動碳排放表

| 路線 | 平均來回一趟距離 (Km) | 稻殼稻萬重量 (tonnes) | 生物質運輸 洩漏碳排放 (tCO ₂) | 生物炭乾重 (tonnes) | 生物炭運輸 洩漏碳排放 (tCO ₂) |
|---------|------------------|--------------------|---------------------------------------|-------------------|---------------------------------------|
| 新北市↔桃園市 | 62 | 895.18 | 0 | 787.65 | 0 |
| 臺北市↔桃園市 | 62 | 1954.20 | 0 | 787.65 | 0 |
| 新竹縣↔桃園市 | 80 | 44491.26 | 0 | 787.65 | 0 |
| 新竹市↔桃園市 | 104 | 6725.75 | 0 | 787.65 | 0 |
| 宜蘭縣↔桃園市 | 168 | 86520.35 | 0 | 787.65 | 0 |
| 基隆市↔桃園市 | 105 | 0.00 | 0 | 787.65 | 0 |
| 桃園市↔桃園市 | 50 | 88003.97 | 0 | 787.65 | 0 |
| 苗栗縣↔台中市 | 106 | 61368.87 | 0 | 4511.39 | 0 |
| 彰化縣↔台中市 | 56 | 361439.54 | 0 | 4511.39 | 0 |
| 南投縣↔台中市 | 42 | 32563.82 | 0 | 4511.39 | 0 |
| 雲林縣↔台中市 | 136 | 327199.25 | 0 | 4511.39 | 0 |
| 台中市↔台中市 | 30 | 152636.66 | 0 | 4511.39 | 0 |
| 臺南市↔嘉義縣 | 148 | 174993.78 | 0 | 2538.63 | 0 |
| 高雄市↔嘉義縣 | 228 | 45471.24 | 1337.40 | 2538.63 | 501.35 |
| 屏東縣↔嘉義縣 | 232 | 55884.40 | 1672.51 | 2538.63 | 510.03 |
| 嘉義市↔嘉義縣 | 38 | 10736.85 | 0 | 2538.63 | 0 |
| 嘉義縣↔嘉義縣 | 38 | 239169.24 | 0 | 2538.63 | 0 |
| 台東縣↔花蓮縣 | 336 | 82771.32 | 3587.64 | 1947.39 | 566.19 |
| 花蓮縣↔花蓮縣 | 68.8 | 78705.13 | 0 | 1947.39 | 0 |

8. 淨溫室氣體移除量

淨移除量根據基線排放減去專案排放和洩漏，加上專案生產階段移除量計算，在高技術生產設備情境下，淨移除量 ER_y 為 355219.98 tCO₂e；低技術生產設備淨移除量 ER_y 則是 238858.23 tCO₂e。

由上述公式計算各階段排放與移除量得出，使用 VM0044 專案高技術生產設備一年能移除 355,219.98 tCO₂e，每產 1 tCO₂e 淨移除量可申請 1 個 VCU，該專案活動可獲發 355,219.98 個 VCUs。

使用 VM0044 專案低技術生產設備一年能移除 238,858.23 tCO₂e，每產 1 tCO₂e 淨移除量可申請 1 個 VCU，該專案活動可獲發 238,858.23 個 VCUs。

9. 預估潛在收益

根據 2025 年市場資料，生物炭碳信用每 tCO₂e (1 VCU) 約 177 美元。

表 18 VCUs 價格估算

| 價格 | 高技術設備情境 | 低技術設備情境 |
|-----------------------------|--------------------|--------------------|
| \$177USD/tCO ₂ e | \$62,873,937.02USD | \$42,277,907.28USD |

上述數據假設所有 VCUs 均可於當前平均市場價格完全售出，未扣除經紀手續費、保險緩衝或其他交易成本。若擁有 23.8 萬至 35.5 萬個生物炭型 VCUs，則 2025 年可於國際市場賣得約 4,227 萬至 6,287 萬美元（以美元兌新台幣匯率為 30 計算，約新台幣 12 億至 18 億元），具體價格需視專案品質與市場行情及匯率而定。

(二) Puro.earth

1. 基線情境

專案採用保守的假設，設定基線情境為零排放，不考慮廢棄物自然分解或燃燒所產生的 CH₄ 或 CO₂。

2. 系統邊界

自搖籃到墳墓，從農產廢棄物之收集開始，以稻殼、稻蒿為原料經熱裂解處理產生生物炭，並應用於農田土壤改良。邊界涵蓋所有可能產生溫室氣體排放的環節，包括原料運輸、製程機械運作與設備維護等活動，依據 Puro.earth Biochar Methodology 分為以下三項： $E_{biomass}$ 、 $E_{production}$ 、與 E_{use} 。同時， E_{stored} 依據生

物炭的產量、有機碳含量與穩定性因子估算，以計算最終的 CORCs。

3. 生物炭封存計算 (E_{Stored})

- A. 農業廢棄物的使用要求：對於農業廢棄物，為避免降低土壤健康和作物產量，必須將 30% 的殘留物留在田間（表 19）。稻蒿在田間內風乾或晾乾，稻殼從碾米廠收集。
- B. 生物質廢棄物來源：本研究依據 113 年度農業部統計，臺灣各地區稻穀年產量分別為北部 190,492 噸、中部 779,340 噸、南部 438,546 噸、東部 134,564 噸。
- 稻殼產量計算：本研究採用農業部建議以稻穀產量之兩成計算。
 - 稻蒿產量計算：臺灣地區水稻之蒿穀比例約在 0.9 至 1.2 之間，本研究採用農業部建議以 1.0 計算。
 - 原料乾重換算：行政院原子能委員會委託國立東華大學執行之研究報告《東臺灣生質能源資源循環型利用之發展潛能評估與案例分析》（蘇美惠，2016），其中針對花蓮縣 2014 年各鄉鎮稻作產量及農業廢棄物產生量進行系統化調查與估算。由該文獻可得知稻殼與稻蒿乾重皆係由田間產量（含水狀態）乘以乾重轉換係數推估而得，分別為稻殼 95% 及稻蒿 90%。此比值代表在未進一步乾燥處理的田間收穫後，稻殼約含 5% 水分，而稻蒿約含 10% 水分。此種固定比例推估雖未反映區域間氣候與品種差異，但已可作為本研究在估算稻作副產物乾重量與進行碳資源化潛力評估時之依據。（表 13）
 - 熱裂解過程，產生之固體產物產率為稻殼 37.4%，稻蒿為 30.6%（表 20）。
 - 在 puro.earth 方法學中，會考慮生物炭在 100 年內之分解狀況來決定有效的碳移除量。而代表此持久性之係數 $F_p^{TH,Ts}$ 受到施用地區之土壤溫度影響（Woolf et al., 2021）。根據中央氣象署（2025），2024 年各區之土壤溫度列於表 21，並根據此溫度進行 $F_p^{TH,Ts}$ 之計算。

表 19 113 年臺灣各地區稻殼稻蒿利用上限比率（單位：公噸/年）

| 地區 | 可使用上限量 | |
|----|-----------|-----------|
| | 稻殼 | 稻蒿 |
| 北部 | 25335.47 | 120010.12 |
| 中部 | 103652.24 | 490984.27 |
| 南部 | 58326.65 | 276284.14 |
| 東部 | 17896.97 | 84775.14 |
| 總計 | 205211.33 | 972053.67 |

資料來源：農業部 113 年度農業廢棄物排放量歷年表

表 20 稻殼稻蒿轉化為生物炭之乾重（單位：公噸）

| 地區 | 生物炭 | |
|----|----------|-----------|
| | 稻殼 | 稻蒿 |
| 北部 | 9475.47 | 36723.10 |
| 中部 | 38765.94 | 150241.19 |
| 南部 | 21814.17 | 84542.95 |
| 東部 | 6693.47 | 25941.19 |
| 總計 | 76749.04 | 297448.42 |

表 21 各地土壤溫度

| 地區 | 年均土壤溫度 (°C) | 土壤深度 (cm) | 氣象站編號 |
|-------|----------------|-----------|--------|
| 北（新北） | 23.6 | 10 | 466881 |
| 中（臺中） | 24.9 | 10 | 467490 |
| 南（嘉義） | 22.7 | 10 | 467480 |
| 東（台東） | 25.2 | 10 | 467660 |

資料來源：中央氣象署，2025

根據上述條件，本研究算出 $Q_{biochar}$ 以及 E_{stored} ，各區結果列於表 28。可以發現稻穀產量最大的中部地區呈現最大的生物炭產量與 E_{stored} （稻殼：25245.23 tCO₂e；稻蒿 178074.39 tCO₂e）。

表 22 100 年尺度下生物炭能封存的 CO₂ 量

| 生物炭種類 | $Q_{biochar}$ | C_{org} | H | H/C_{org} | $F_p^{TH, Ts}$ | E_{stored} |
|-------|---------------|-----------|------|-------------|----------------|------------------------|
| | dry tonnes | % | % | mol/mol | % | tonnes CO ₂ |
| 稻殼（北） | 9475.47 | 31.77 | 1.67 | 0.631 | 0.562 | 6200.57 |
| 稻蒿（北） | 36723.10 | 51.25 | 2.04 | 0.478 | 0.634 | 43747.71 |

| | | | | | | |
|-------|-----------|-------|------|-------|-------|-----------|
| 稻殼（中） | 38765.94 | 31.77 | 1.67 | 0.631 | 0.559 | 25245.23 |
| 稻蒿（中） | 150241.19 | 51.25 | 2.04 | 0.478 | 0.631 | 178074.39 |
| 稻殼（南） | 21814.17 | 31.77 | 1.67 | 0.631 | 0.564 | 14328.12 |
| 稻蒿（南） | 84542.95 | 51.25 | 2.04 | 0.478 | 0.636 | 101109.45 |
| 稻殼（東） | 6693.47 | 31.77 | 1.67 | 0.631 | 0.558 | 4354.41 |
| 稻蒿（東） | 25941.19 | 51.25 | 2.04 | 0.478 | 0.630 | 30713.55 |

資料來源：Hidayat et al., 2023；Wu et al., 2012

Puro.earth 方法學中需考慮從原料到最終應用階段過程中所有排放，依照本研究系統邊界設定，排放源來自運輸、電力及塑膠袋包裝製造。運輸部分里程參照表 17；用電則參照

表 23 生命週期碳排放量

| 排放專案 | 次專案 | 排放量(tCO ₂ e) |
|-------------------------|-------|-------------------------|
| E _{biomass} | 稻殼運輸 | 2795.18 |
| E _{biomass} | 稻蒿運輸 | 13240.35 |
| E _{production} | 用電 | 42722.57 |
| E _{production} | 塑膠袋包裝 | 11150.38 |
| E _{use} | 生物炭運輸 | 5096.95 |

100 年期內淨 CO₂ 移除量：

根據計算，在 100 年期間內，淨移除的 CO₂ 為 328,768.02 tonnes，由總移除量加總後扣除各項排放後所得結果。

使用 Puro.earth Biochar Methodology 專案生產設備一年能移除 328,768.02 tCO₂e，每產生 1 tCO₂e 淨移除量可申請 1 個 CORC，該專案活動可獲發 328,768.02 個 CORCs。

4. 預估潛在收益

根據 2025 年市場資料，生物炭碳信用每噸 CO₂e (1 CORC) 約 177 美元。

表 24 CORCs 價格估算

| 生物炭碳信用 1ton 價格 | 收益 |
|-----------------------------|----------------------|
| \$177USD/tCO ₂ e | \$ 58,191,940.25 USD |

上述假設所有 CORCs 均可於當前平均市場價格完全售出，未扣除經紀手續費、保險緩衝或其他交易成本。若擁有 328768.02 個生物炭型 CORCs，則 2025 年可於

國際市場賣得約 5819 萬美元（以美元兌新台幣匯率為 30 計算，約新台幣 17 億元），具體價格需視專案品質與市場行情及匯率而定。

根據上述兩種方法學計算結果發現，VM0044 專案之高技術生產設備情境總收益約 18 億新台幣，比 Puro.earth Biochar Methodology 專案收益約高於 1 億元。而經濟效益最低者是採用 VM0044 之低技術生產設備為模擬情境的 12 億新台幣。

為進一步分析上述差異所致之原因，本研究將兩方法學在核心計算公式與排放假設上的異同，歸納出導致碳移除量與最終收益差異的關鍵因素。

兩方法學從農業廢棄物最高可使用上限之規範存在顯著差異。VM0044 規定田間之農業廢棄物移除量不得超過 50%，以維持農地有機質與土壤健康；而 Puro.earth 則容許最高達 70% 的移除比例。此一設定使得兩方法學在本研究模擬情境下，最終生產的生物炭總量差距約 9 萬公噸，進一步影響碳封存量與碳信用收益。在運輸碳排放的設定上亦有所不同。VM0044 於運輸距離不超過 200Km 時，允許忽略該部分碳排放；但 Puro.earth 則規定，凡涉及任何運輸活動皆須納入 LCA 進行排放估算。

對於 CH₄ 逸散如何計算碳排，兩方法學都有嚴謹規範，但在制度上呈現些許差異。Puro.earth 要求生產設備須設有工程控制機制以燃燒或回收熱裂解氣體，若未能有效控制，其逸散之 CH₄ 必須完整納入 LCA，並以各階段溫室氣體的實際排放量進行分項評估。VM0044 對 CH₄ 排放的計算依設備不同而異。若能證明生物炭生產設備符合方法學之高技術設備條件，則 CH₄ 排放可視為忽略；低技術生產設備則必須依據方法學內提供之預設係數，將 CH₄ 逸散完整計入專案排放。

兩方法學在運輸與能源排放係數的採用依據也有所不同。VM0044 依據 CDM 所發布之 TOOL12 進行運輸階段碳排放的係數計算，Puro.earth 則採用 LCA 資料庫所建立之排放係數。在化石燃料燃燒所導致碳排放估算方面，VM0044 使用 CDM TOOL03 進行規範，而 Puro.earth 仍然延續以 LCA 資料庫中建模的能源排放數據為依據。在電力排放係數的規定上，VM0044 規定專案應採用當地政府所公告之最新電力排放係數，並引用 CDM TOOL05 作為公式計算依據；Puro.earth 可使用 LCA 資料庫中既有之電力，也可以當地政府所公告之最新電力排放係數資料進行估算。

在碳移除量方面，VM0044 高技術生產設備情境一年能比 Puro.earth Biochar

Methodology 多移除約 2 萬 tCO₂e。專案開發者利用 VM0044 高技術生產設備情境生產的每公噸生物炭能夠移除 1.27 tCO₂e，低技術生產設備情境則可以每公噸生物炭移除 0.85 tCO₂e；利用 Puro.earth Biochar Methodology 專案，每公噸的生物炭則能移除 0.88 tCO₂e。

Puro.earth 專案在碳排放計算上採取更為全面的 LCA，導致其實際可核發之碳信用額度略低於 VM0044 的高技術生產設備情境。然其投入之原料量較 VM0044 大，有助於提高碳封存總量。相對的，VM0044 方法學雖允許部分碳排專案忽略不計，以提升碳移除效率，但其在原料投入量上的保守設定可能限制了最大化收益的潛力。

第二節 適用性條件分析

考量生物炭生產與應用過程涉及原料供應之穩定性、氣候與地質條件對生物炭施用之影響、臺灣現有熱裂解技術成熟度與處理能力、污染物法規規範限制，以及技術門檻與推廣限制等因素。透過上述分析，將為後續碳信用量化與政策制定提供科學依據與操作建議。

(一) 原料供應穩定性

本研究以稻殼與稻蒿為生物炭原料，整體原料在來源產量、地理分布方面均具備穩定供應之潛力（表 2）。臺灣水稻生產主要集中於中南部平原，地域分布有利於集運與就地初步處理，稻殼由碾米廠系統性回收，稻蒿則多為稻穀收割後就地殘留於田間，規模大且可預測。這種模式不僅使農業廢棄物來源充裕、品質一致，也有助於專案活動在原料收集階段建立可量化的操作流程，有利於後續熱裂解製程的穩定運作，並提升碳移除量估算之準確性。

然而實務推動過程中，生物炭原料供應的穩定性仍會受到農業現場管理實務、政策誘因與相關副產業競爭等多重因子影響。例如，稻殼多數仍被應用於禽畜舍墊料、燃料及薪材（圖 13）等傳統用途，遇市場需求偏移時會影響供應分配；稻蒿則經常作為田間秸稈就地翻耕掩埋、作物栽培覆蓋或堆肥。農業部雖然在《第三期農業部門溫室氣體減量行動方案(草案)》裡針對農業廢棄物提出相關策略，但原料供應之穩定性，實際上仰賴上游產地端、中游運輸物流與下游處理

企業間之協同運作，方能維持整體供應鏈的韌性與運作效率。除此之外，原料收集與運輸亦須因應收成高峰期、極端氣候等短期變異，必須將其列入供應穩定性之風險評估。

本研究分析臺灣之所以能夠穩定使用稻殼和稻蒿作為生物炭的原料，主要是因為水稻產業長期以來的規模化生產、集約化的產地管理，使原料產出具備供應穩定性。這樣的基礎不論在取得便利性、集中運輸效率或品質穩定性方面，都具有相當好的條件。即使在短期內出現需求變化，系統也有一定的調整空間。但目前臺灣生物炭產業在原料收運、熱裂解技術商業化，以及碳交易市場等環節尚未成熟，為了讓整體供應系統更有彈性、成本更容易控制，政府與產業端仍需要持續投入，例如改善運輸方式、調整收購價格制度、提升災害應變能力，以及協調原料與其他用途之間的分配，才能進一步強化原料供應的穩定性和永續發展的可能。

(二) 氣候與地質條件

臺灣是一個地形多變、氣候潮濕且颱風頻繁的島嶼，農業環境面臨著土壤酸化、地力衰竭等挑戰，因此生物炭作為土壤改良材料近年來受到廣泛討論。以下從臺灣土壤酸鹼特性、地形陡急、颱風影響及生物炭施用後的不可逆性，分析生物炭在臺灣的適用性。

1. 土壤酸鹼特性

臺灣約有 70% 的土壤（圖 14）屬於酸性（連深，1991），這與高降雨量有關，因雨水會淋洗掉土壤中的鹼性離子，導致土壤 pH 值下降。酸性土壤雖適合部分耐酸作物如稻米、鳳梨、茶等（林永鴻，2001），但對多數作物而言，土壤過酸會造成養分缺乏、微量元素毒害等問題。生物炭由於其鹼性特性，已被證實可以有效中和酸性土壤，提升 pH 值，並增加有機質和陽離子交換量，改善土壤肥力（El-Naggar et al., 2018）。

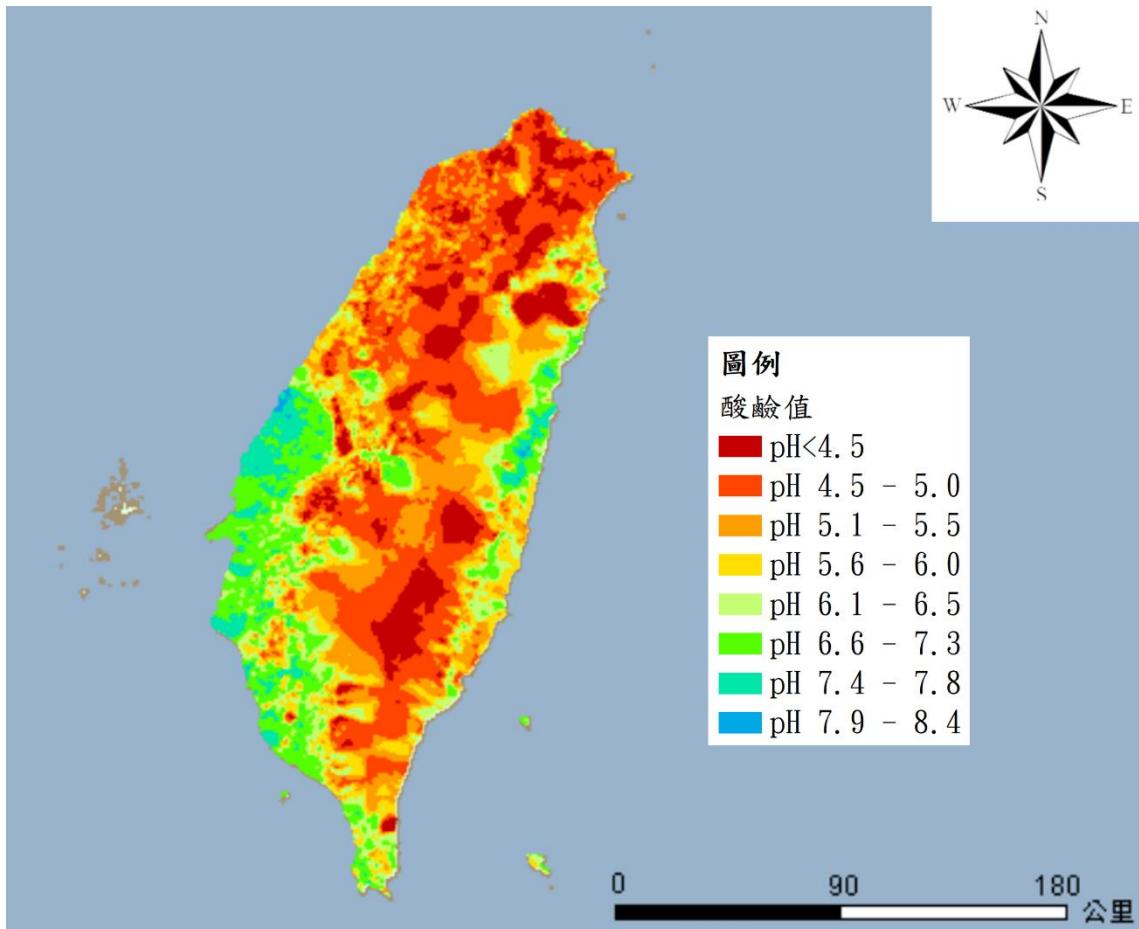


圖 14 臺灣土壤酸鹼值（農業部農試所, 2015）。

2. 降雨與地形對生物炭穩定性的影響

臺灣降雨集中、短時、強度高，即使在平地農田也可能造成表土與改良材料的流失，若施用於坡地農田，其受雨水沖刷的風險更為嚴峻，進一步挑戰生物炭在土壤中的穩定性與持久性，恐影響其改良效益（李與鄭，2022）。

3. 颱風與生物炭流失風險

臺灣每年平均受到 3 至 4 個颱風侵襲（中央氣象局，2021 年），颱風會帶來強風和豪雨，不僅加劇水土流失，也可能將施用於表土的生物炭吹散或沖入河川、海洋。這不僅降低生物炭對土壤的改良效益，還可能對水體生態造成潛在影響。颱風過後，大量有機質和碳素會被帶入海洋，若生物炭也隨之進入水體，其長期的生態效應尚待評估（李與鄭，2022）。

4. 生物炭施用後的不可逆性

一旦生物炭被施入土壤，由於其顆粒細小且與土壤緊密結合，幾乎無法再完整

取出 (Gul et al., 2015; Meng et al., 2025)。若施用量過多或材料品質不佳，可能導致土壤結構改變、養分被過度吸附、甚至帶來污染風險 (Kabir et al., 2023)。尤其臺灣土壤多元，不同地區土壤性質差異大，生物炭的原料、燒製條件也會影響其效果，若未嚴格控管，可能造成負面影響。

(三) 製程與技術能力

臺灣已具備商業化量產生物炭的熱裂解設備與配套系統，相關設備的氣體處理與操作技術均符合法規及國際驗證標準。

國立中興大學所研發的連續式進料量產生物炭多膛爐系統，為一套每小時可處理 100 公斤原料的設備，具備液態副產品回收功能，並已通過煙氣排放的環保標準測試，實際應用於農林剩餘資材的處理 (農業知識入口網，2022)。光泰環能所引進之 PX 热裂解炭化系統，為結合德國技術的「臺灣山椒魚號」設備，每年可產製高達 300 噸生物炭及 700 噸碳匯，具備精準溫控能力 (450 至 600°C) 與即時數據上傳功能，並符合 EBC 標準。

(四) 污染物之規範與評估準則

相較於歐盟、美國等地的長期田間試驗與環境影響評估，臺灣目前缺乏大規模施用生物炭後對土壤、地下水與作物的中長期研究結果。

1. 生物炭產品之污染物標準值

臺灣現行的《肥料管理法》、《土壤及地下水污染整治法》雖規範了可合法施用於土壤的有機質肥料與土壤改良資材標準，但尚未將生物炭這類資材設置明確的分類與技術門檻。不同規範對於生物炭中重金屬的可接受濃度有所不同，若目標是申請碳信用額度，需留意更嚴格的標準。目前雖有行政院農業部 (前農業委員會) 農業試驗所 (Taiwan Agriculture Research Institute, TARI) 初步研擬作為參考的生物炭產品品質與安全指標，內容多參酌 IBI、EBC 等國際規範，但截至目前 (2025 年) 尚未形成具法律效力之草案或公告標準 (表 25 表 26)。

因原料、熱裂解條件與後處理方式的不同，生物炭可能在化學組成與環境風險上差異極大。若無一套分級制度與風險評估框架，即使具備潛在農業與碳封存效益，仍難以進入法定肥料或資材體系。

儘管國際方法學已建立明確的標準，並可透過土壤施用將碳封存效益商品化

為碳信用，但臺灣目前並無可銜接的土壤碳匯登錄機制，也缺乏鼓勵農民參與碳匯計畫的誘因措施，導致施用動機與市場驅動力薄弱。

表 25 生物炭產品中重金屬容許標準

| 檢測專案 | TARI ^a (mg kg ⁻¹ dry wt) | IBI (mg kg ⁻¹ dry wt) | EBC-Agro (g t ⁻¹ dry matter) |
|--------|---|-------------------------------------|--|
| 鉛 (Pb) | ≤ 150 | ≤ 121 – 300 | ≤ 120 |
| 鎘 (Cd) | ≤ 1.5 | ≤ 1.4 – 39 | ≤ 1.5 |
| 銅 (Cu) | ≤ 100 | ≤ 143 – 6000 | ≤ 100 |
| 鉻 (Cr) | ≤ 90 | ≤ 93 – 1200 | ≤ 90 |
| 汞 (Hg) | ≤ 1 | ≤ 1 – 17 | ≤ 1 |
| 鎳 (Ni) | ≤ 50 | ≤ 47 – 420 | ≤ 50 |
| 砷 (As) | (無) | ≤ 13 – 100 | ≤ 13 |
| 鋅 (Zn) | ≤ 400 | ≤ 416 – 7400 | ≤ 400 |

a：行政院農業部（前農業委員會）農業試驗所暫擬草案

表 26 生物炭產品中有機污染物容許標準

| 檢測專案 | IBI (dry wt) | EBC-Agro (DM) |
|--------------|-------------------|----------------------------------|
| 多環芳香烴 (PAHs) | 6.0 mg/kg | 6.0 ± 2.4 mg/kg |
| 多氯聯苯 (PCBs) | 0.2 mg/kg | 0.2 mg/kg ⁻¹ |
| 戴奧辛/呋喃 | 177 ng/kg WHO-TEQ | 20 ng kg ⁻¹ I-TEQ OMS |

2. 生物炭應用對環境中污染物濃度規範

評估生物炭環境安全性應同時考量其本體污染物殘留與施用後對環境介質之可能負荷，分別對照資材產品標準與環境容許標準，方能建立完整的風險管控依據。

生物炭可能殘留重金屬，若長期於土壤累積，將潛在影響土壤、地下水與食用作物安全。本研究評估生物炭潛在環境風險時，選擇以《土壤及地下水污染防治法》所公告之監測（表 27 表 28）標準作為判斷依據，目的在於及早發現並預警可能之污染風險。相較於僅以「管制標準」為準，監測標準之設計更趨保守，能強化對潛在環境影響的評估敏感度，亦與碳信用制度中風險最小化與永續原則相符。此種

作法雖可能低估生物炭之實際可施用量，卻有助於建立更高的環境保護門檻，有利於未來進行碳信用額度申請時的合規性審查。

表 27 地下水污染物之重金屬與有機化合物（單位： mg L^{-1} ）

| 檢測專案 | 第一類監測標準值 | 第二類監測標準值 |
|-------------------|----------|----------|
| 鉛 (Pb) | 0.005 | 0.05 |
| 鎘 (Cd) | 0.0025 | 0.025 |
| 銅 (Cu) | 0.50 | 5.0 |
| 鉻 (Cr) | 0.025 | 0.25 |
| 汞 (Hg) | 0.0010 | 0.010 |
| 鎳 (Ni) | 0.05 | 0.5 |
| 砷 (As) | 0.025 | 0.25 |
| 鋅 (Zn) | 2.5 | 25.0 |
| 苯 (Benzene) | 0.0025 | 0.025 |
| 甲苯 (Toluene) | 0.5 | 5.0 |
| 乙苯 (Ethylbenzene) | 0.35 | 3.5 |
| 二甲苯 (Xylenes) | 5.0 | 50 |
| 多環芳香烴 (PAHs) | (無) | (無) |
| 多氯聯苯 (PCBs) | (無) | (無) |
| 戴奧辛/呋喃 | (無) | (無) |

表 28 土壤污染物之重金屬與有機化合物（單位： mg kg^{-1} soil）

| 檢測專案 | 監測標準值 |
|-------------------|--------------------------|
| 鉛 (Pb) | 1000 (食用作物農地之監測標準值為 300) |
| 鎘 (Cd) | 10 (食用作物農地之監測標準值為 2.5) |
| 銅 (Cu) | 220 (食用作物農地之監測標準值為 120) |
| 鉻 (Cr) | 175 |
| 汞 (Hg) | 10 (食用作物農地之監測標準值為 2) |
| 鎳 (Ni) | 130 |
| 砷 (As) | 30 |
| 鋅 (Zn) | 1000 (食用作物農地之監測標準值為 260) |
| 檢測專案 | 管制標準值 |
| 苯 (Benzene) | 5 |
| 甲苯 (Toluene) | 500 |
| 乙苯 (Ethylbenzene) | 250 |
| 二甲苯 (Xylenes) | 500 |
| 多環芳香烴 (PAHs) | (無) |
| 多氯聯苯 (PCBs) | 0.09 |
| 戴奧辛/呋喃 | 1000 ng I-TEQ/kg soil |

3. 生物炭污染控制標準比較與臺灣應用建議

綜合比較 EBC-Agro、IBI 與臺灣生物炭產品之污染物標準值及環境規範，可

以明顯看出三者間規範嚴謹度與完整性存在顯著差異。EBC-Agro 標準不僅涵蓋重金屬，更對有機污染物如 PAHs、PCBs、戴奧辛/呋喃等設有明確且嚴格的限值，並針對不同應用場景（農業、飼料、都市、消費品、工業材料）制定專屬規範，強調生產批次控管、第三方認證與完整可追溯性。IBI 則以彈性與寬鬆為特點，重金屬限值較高，有機污染物規範相對缺乏，適合基礎合規但風險管控較弱。臺灣規範在重金屬部分與 EBC 相近，然而有機污染物及部分重金屬（如砷、銅、鎳、鉻）尚未明確規範於生物炭產品標準，環境介質規範雖有但未針對生物炭應用細分。

（五）技術門檻限制

VM0044、Puro.earth 皆要求生物炭生產需通過生物炭碳穩定性測試（Biochar Carbon Permanence, BCP）與 LCA，其技術門檻表現在三方面：

1. **監測、報告及驗證**（Monitoring, Reporting, and Verification, MRV）成本高與審查週期長：VM0044 方法學之監測成本結構對小型生產者不具經濟可行性，單一專案年度驗證費用包含現場勘查（8-12 萬元）、數據審查（5-7 萬元）與報告簽證（3-5 萬元），最低總成本約 16 萬元。若碳信用銷售額低於 20 萬元/年，將出現收益倒掛。
2. **BCP 測試成本結構**：需執行加速氧化實驗（100 天 80°C）與碳-13 核磁共振分析，單一樣品檢測費用約新台幣 8-12 萬元。對年產能低於 500 噸的小型生產者而言，檢測成本佔總營收之比例不低。
3. **LCA 建模複雜度**：Puro.earth 要求量化從原料收集到熱裂解過程的碳足跡，需整合 GIS 運輸距離分析與設備能耗監測數據。
4. **品質驗證瓶頸**：在分析生物炭的性質時，常會關注一些關鍵參數，例如 BET 比表面積（用來判斷孔隙結構）和 H/Corg 比值（作為芳香性與穩定性的指標）。這些參數的取得需要搭配不同的儀器，例如可以透過掃描式電子顯微鏡（Scanning Electron Microscope, SEM）觀察材料的表面結構，並利用元素分析儀來測定碳氫含量，進一步計算 H/Corg。

即使 SGS 等驗證機構可執行檢測，但小型業者缺乏規模經濟，難以分攤驗證成本。

第五章 結論

臺灣農業生物質廢棄物在碳信用市場上具有可觀的開發潛力。根據統計，臺灣每年約產生 240 萬噸農業廢棄物，其中稻殼與稻蒿於 2024 年的產生量高達 180 萬噸，為生物炭技術的本地推廣提供穩定且充足的原料基礎。

根據本研究所建構的臺灣在地情境模擬，以 2024 年稻殼與稻蒿作為原料，搭配先進連續式熱裂解設備，依照 VM0044，預估可生產約 28 萬噸生物炭，若採用高技術設備，可以移除 35.5 萬噸的 CO₂；若採用低技術設備，則可移除 23.8 萬噸的 CO₂。若依據 Puro.earth 方法學，預估可生產 37.4 萬噸生物炭，並且可移除 32.9 萬噸的 CO₂。根據以上碳移除量，其潛在的碳信用收入可達新台幣 12-18 億元。由此可見，在經濟上，臺灣農業生物炭專案具備相當規模的市場潛力，若順利導入國際或本地碳交易市場，將可促進綠色產業發展與農業永續轉型。

值得注意的是，生物炭生產雖具備減碳與經濟效益潛力，仍伴隨資本投資需求與環境風險，包括高溫熱裂解設備之初期設置成本、能源使用與潛在污染物（如重金屬與有機污染物）逸散風險等。目前相關評估尚不完整，若欲全面檢視臺灣推動生物炭碳信用專案之可行性，未來應納入完整的經濟成本結構、污染控制需求與環境安全標準，建構系統性的成本效益分析與風險管理機制，以確保永續推動之實質可行性。

藉由臺灣農業廢棄物情境進行初步推估與方法學模擬，顯示生物炭技術具備一定的規模應用潛力與碳信用收益可能性，亦展現其在碳封存量化與市場交易評估上的實務參考價值。相關結果可作為未來氣候行動與農業永續策略規劃之初步依據，惟仍需更多實證研究與在地數據進一步驗證。

參考文獻

- 丁執宇（1998）。生命週期衝擊評估方法介紹及應用。《工業污染防治》，66，96-104。
- 江汶錦（2021）。生物炭在田間施用之效果。《臺南區農業專訊》，(117)，11。
- 李慧宜、鄭傑憶（2022年6月22日）。農委會欲推生物炭入30萬公頃土壤，學者：風險難估，需建立本土科學依據。《上下游新聞市集》。
<https://www.newsmarket.com.tw/blog/171096/>
- 國家發展委員會（2022年3月30日）。2050淨零排放路徑及12項關鍵戰略。行政院國家發展委員會。<https://ncsd.ndc.gov.tw/Fore/nsdn/about0/2050Path>
- 張容蓉、鄒裕民（2007）。炭化稻草對於2-氯酚之吸附。臺灣農業化學與食品科學, 45(4&5), 206–217。<https://doi.org/10.6578/TJACFS.2007.024>
- 許祖菱（2025年5月29日）。微軟、Google都在買！逾6成生物炭合約被企業鎖定，這款碳移除技術為什麼？【分析】。《RECESSARY》。
<https://www.reccessary.com/zh-tw/news/why-biochar-is-booming>
- 連深（1991）。酸性土壤之利用與改良。載於《土壤管理手冊》（頁263）。國立中興大學土壤調查試驗中心。
- 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。
<https://doi.org/10.6578/TJACFS.2011.016>
- 陳尊賢（1992）。臺灣農地酸性土壤之特性及其分類。收錄於《酸性土壤之特性及其改良研討會論文集》（頁2–1）。中華民國土壤肥料學會。
- 農業知識入口網（2022年11月7日）。新竹林管處與國立中興大學簽署合作協議書 林業剩餘資材華麗轉身成綠金。
https://kmweb.moa.gov.tw/theme_data.php?theme=news&sub_theme=quality_farmer&id=72627
- 農業科技決策資訊平台（2024年7月15日）。生物炭及其醋液於有機肥料產品生產製作技術。檢自 <https://agritech-foresight.atri.org.tw/article/contents/5589>
- 農業部（2024）。113年綠色國民所得帳農業固體廢棄物歷年表。農業統計資料查詢系統。<https://agrstat.moa.gov.tw/sdweb/public/common/Download.aspx>
- 臺灣農業科技資源運籌管理學會（2017年7月1日）。生物炭產業國際趨勢報告

(第4頁)。

環境部(2022)。產品碳足跡標準運輸排放係數查詢。產品碳足跡資訊網。

<https://cfp-calculate.tw/>

簡士豪、江介倫、王建昇、張庠睿(2012)。添加生物炭對酸性紅壤肥力之影響。農業工程學報, 58(4), 1–10。

Anando, A. I., Ehsan, M. M., Karim, M. R., Bhuiyan, A. A., Ahiduzzaman, M., & Karim, A. (2023). Thermochemical pretreatments to improve the fuel properties of rice husk: A review. Renewable Energy, 215, 118917.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.118917>

Andrew, S. S. (2006). Crop Residue Removal for Biomass Energy Production: Effects on Soils and Recommendations. USDA-Natural Resource Conservation Service. Retrieved from https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2023-04/nrcs142p2_053253.pdf

Battaglia, M., Thomason, W., Fike, J. H., Evanylo, G., von Cossel, M., Babur, E., Iqbal, Y., & Diatta, A. (2020). The broad impacts of corn stover and wheat straw removal for biofuel production on crop productivity, soil health and greenhouse gas emissions: A review. GCB Bioenergy, 13(1), 45–57.
<https://doi.org/10.1111/gcbb.12774>

Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. Biomass and Bioenergy, 38, 68–94. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>

Cha, J. S., Park, S. H., Jung, S.-C., Ryu, C., Jeon, J.-K., Shin, M.-C., & Park, Y.-K. (2016). Production and utilization of biochar: A review. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 40, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2016.06.002>

Cornelissen, G., Pandit, N. R., Taylor, P., Pandit, B. H., Sparrevik, M., & Schmidt, H. P. (2016). Emissions and char quality of flame-curtain "Kon Tiki" kilns for farmer-scale charcoal/biochar production. PLOS ONE, 11(5), e0154617.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154617>

Ding, J. (2023). Soil nitrogen transformation and functional microbial abundance in an agricultural soil amended with biochar. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 47, e0220156. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20220156>

DNV. (2023). *Puro.Earth facility and output audit report: Carbofex Oy (Puro Standard General Rules Edition 2022, Version v2)*. Carbofex Oy.

DNV. (2024). *Puro.Earth output audit report: Carbofex Oy (Puro Standard General Rules Edition 2024, Version v4)*. Carbofex Oy.

DNV. (2025). *Puro.Earth output audit report: Carbofex Oy (Puro Standard General Rules, v3.1)*. Carbofex Oy.

Duwiejuah, A. B., Abubakari, A. H., Quainoo, A. K., & Amadu, Y. (2020). Review of biochar properties and remediation of metal pollution of water and soil. *Journal of Health and Pollution*, 10(27), Article 200902. <https://doi.org/10.5696/2156-9614-10.27.200902>

Ecobio. (2023). *LCA report – Carbofex's biochar product: Life cycle assessment according to ISO 14040 and Puro.Earth Biochar methodology*. Carbofex.

European Biochar Certificate (EBC) (2022). Guidelines for a Sustainable Production of Biochar, version 10.1. European Biochar Foundation. Retrieved from <https://www.europeanbiochar>.

European Biochar Certificate (EBC) (2023). *European Biochar Certificate – Guidelines for a sustainable production of biochar* (Version 10.3). Carbon Standards International. <https://www.european-biochar.org>

Gul, S., Whalen, J. K., Thomas, B. W., Sachdeva, V., & Deng, H. (2015). Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: Mechanisms and future directions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 206, 46–59. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.03.015>

Gul, S., Whalen, J. K., Thomas, B. W., Sachdeva, V., & Deng, H. (2015). Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: Mechanisms and future directions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 206, 46–59. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.03.015>

Hamidu, I., Afotey, B., Kwakye-Awuah, B., & Anang, D. A. (2025). Synthesis of silica and silicon from rice husk feedstock: A review. *Heliyon*, 11, e42491. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42491>

- Hassan, M., Liu, Y., Naidu, R., Parikh, S. J., Du, J., Qi, F., & Willett, I. R. (2020). Influences of feedstock sources and pyrolysis temperature on the properties of biochar and functionality as adsorbents: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 744, 140714. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140714>
- He, M., Xu, Z., Sun, Y., Chan, P. S., Lui, I., & Tsang, D. C. W. (2021). Critical impacts of pyrolysis conditions and activation methods on application-oriented production of wood waste-derived biochar. *Bioresource Technology*, 341, 125811. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125811>
- Hedley, M., Camps-Arbestain, M., McLaren, S., Jones, J., & Chen, Q. (2020). A Review of Evidence for the Potential Role of Biochar to Reduce Net GHG Emissions from New Zealand Agriculture. Ministry of Primary Industries and the New Zealand Agricultural GHG Research Center. Retrieved from <https://www.ag-emissions.nz/assets/Publications/Potential-Role-of-Biochar-in-NZ-2021.pdf>
- Hidayat, A., Rahmat, A., Nissa, R. C., Sukamto, S., Nuraini, L., Nurtanto, M., & Ramadhani, W. S. (2023). Analysis of rice husk biochar characteristics under different pyrolysis temperature. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1201(1), 012095. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1201/1/012095>
- ICF S.A., Cerulogy, & Fraunhofer ISI. (2024). Support to the development of methodologies for the certification of industrial carbon removals with permanent storage: Review of carbon removals through biochar (Job No. 330301431) [Report submitted to the European Commission Directorate General for Climate Action]. European Commission. https://climate.ec.europa.eu/document/download/51aaaada-e29b-4bce-a34e-878d4d264846_en?filename=policy_carbon_expert_review_biochar_en.pdf&prefLang=it
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). Climate change 2022: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (P. R. Shukla, J. Skea, R. Slade, et al., Eds.). Cambridge University Press.

<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>

IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

J. Lehmann, S. Joseph (Eds.), Biochar for Environmental Management Science and Technology, Earthscans, UK (2009), pp. 1-12Juyal, V. (2024, November). Global biochar market size, share, and trends analysis report – Industry overview and forecast to 2032. Data Bridge Market Research.

<https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-biochar-market>

Kabir, E., Kim, K.-H., & Kwon, E. E. (2023). Biochar as a tool for the improvement of soil and environment. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1324533.

<https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1324533>

Kazawadi, D., Ntalikwa, J., & Kombe, G. (2021). A review of intermediate pyrolysis as a technology of biomass conversion for coproduction of biooil and adsorption biochar. *Journal of Renewable Energy*. <https://doi.org/10.1155/2021/5533780>

Knowledge Sourcing Intelligence. (2024). Biochar market – Forecasts from 2024 to 2029 (Product Code: 1456900). Global Information, Inc.

<https://www.giiresearch.com/report/ksi1456900-biochar-market-forecasts-from.html>

Meng, F., Wang, Y., & Wei, Y. (2025). Advancements in biochar for soil remediation of heavy metals and/or organic pollutants. *Materials*, 18(7), 1524.

<https://doi.org/10.3390/ma18071524>

Metz, B., Davidson, O. R., Bosch, P. R., Dave, R., & Meyer, L. A. (2007). Contribution of working group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.

Moharir, A. (2025). Biochar market report 2025 (Global edition). Cognitive Market Research. <https://www.cognitivemarketresearch.com/biochar-market-report>

Muralikrishna, I. V., & Manickam, V. (2017). Chapter five – Life cycle assessment. In Environmental management: Science and engineering for industry (pp. 57–75). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811989-1.00005-1>

- Oraby, G. A. E. M., Putra, F., Natsir, M. H., Siswanto, D., Abdullah, M. M., & Abulibdeh, A. (2025). Straw burning dilemma in modern agriculture: A systematic review of driving factors, environmental impacts, and sustainable solutions. *Rice Science*. Advance online publication.
<https://doi.org/10.1016/j.rsci.2025.06.007>
- Shen, Q., & Wu, H. (2023). Rapid pyrolysis of biochar prepared from slow and fast pyrolysis: The effects of particle residence time on char properties. *Proceedings of the Combustion Institute*, 39(3), 3371–3378.
<https://doi.org/10.1016/j.proci.2022.07.119>
- Sun, Z., Yang, X., Liu, G., Cheng, C., Zhang, B., Li, M., Yang, B., & Wu, Z. (2025). Preparing hydrogen-rich syngas by chemical looping reforming of wheat straw pyrolysis volatiles via NiFe₂O₄@SBA-15 oxygen carrier. *Chemical Engineering Science*, 314, 121780. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2025.121780>
- Supercritical. (2025). Locked in or left behind? Biochar offtakes in 2025 [Report]. <https://25023219.fs1.hubspotusercontent-eu1.net/hubfs/25023219/Supercritical%20Biochar%20Offtakes%20Report.pdf>
- Sylvera. (2025). *Carbon offset pricing trends: What buyers should budget for in 2025*. Sylvera. <https://www.sylvera.com/blog/carbon-offset-price>
- Tan, S., Zhou, G., Yang, Q., Ge, S., Liu, J., Wang Cheng, Y., Yuh Yek, P. N., Wan Mahari, W. A., Kong, S. H., Chang, J. S., Sonne, C., Chong, W. W. F., & Lam, S. S. (2023). Utilization of current pyrolysis technology to convert biomass and manure waste into biochar for soil remediation: A review. *Science of The Total Environment*, 864, 160990. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160990>
- Together for Restoration. (2023). Project Reignite: Turning farm waste to climate action (Version 1). SRCNatura Sure Pvt. Ltd.
<https://registry.verra.org/app/projectDetail/VCS/4679>
- Tomczyk, A., Sokołowska, Z., & Boguta, P. (2020). Biochar physicochemical properties: Pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 19(2), 191–215.
<https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3>

- Tomczyk, A., Sokołowska, Z., & Boguta, P. (2020). Biochar physicochemical properties: Pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 19, 191–215.
<https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3>
- Tripathi, M., Sahu, J. N., & Ganesan, P. (2016). Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 467–481.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.122>
- Tripathi, M., Sahu, J. N., & Ganesan, P. (2016). Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 467–481.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.122>
- Verified Carbon Standard. (2023) . Project Reignite: Turning Farm Waste to Climate Action.
- Verra. (2024). VCS Standard (Version 4.7). <https://verra.org>
- Vieira, F. R., Luna, C. M. R., Arce, G. L. A. F., & Ávila, I. (2020). Optimization of slow pyrolysis process parameters using a fixed bed reactor for biochar yield from rice husk. *Biomass and Bioenergy*, 132, 105412.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105412>
- Vieira, F. R., Luna, C. M. R., Arce, G. L. A. F., & Ávila, I. (2020). Optimization of slow pyrolysis process parameters using a fixed bed reactor for biochar yield from rice husk. *Biomass and Bioenergy*, 132, 105412.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105412>
- Vuppaladadiyam, A. K., Vuppaladadiyam, S. S. V., Sahoo, A., Murugavelh, S., Anthony, E., Bhaskar, T., Zheng, Y., Zhao, M., Duan, H., Zhao, Y., Antunes, E., Sarmah, A. K., & Leu, S.-Y. (2023). Bio-oil and biochar from the pyrolytic conversion of biomass: A current and future perspective on the trade-off between economic, environmental, and technical indicators. *Science of the Total Environment*, 857, 159155. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159155>
- Wang, G., Fan, B., Chen, H., & Li, Y. (2020). Understanding the pyrolysis behavior of

agriculture, forest and aquatic biomass: Products distribution and characterization. *Journal of the Energy Institute*, 93(5), 1892–1900.
<https://doi.org/10.1016/j.joei.2020.04.004>

Wang, J., & Wang, S. (2019). Preparation, modification and environmental application of biochar: A review. *Journal of Cleaner Production*, 227, 1002–1022.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.282>

Weber, K., & Quicker, P. (2018). Properties of biochar. *Fuel*, 217, 240–261.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.054>

Woolf, D., Lehmann, J., Ogle, S., Kishimoto-Mo, A. W., McConkey, B., & Baldock, J. (2021). Greenhouse gas inventory model for biochar additions to soil. *Environmental Science & Technology*, 55(21), 14795–14805.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.1c02425>

Wu, K.-T. (2019). Biochar: Its role and perspectives in agriculture and forestry circular economy in Taiwan. FFTC Agricultural Policy Platform.
<https://ap.fftc.org.tw/article/1429>

Wu, W., Yang, M., Feng, Q., McGrouther, K., Wang, H., Lu, H., & Chen, Y. (2012). Chemical characterization of rice straw-derived biochar for soil amendment. *Biomass and Bioenergy*, 47, 268–276.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.09.034>

Xiao, X., & Chen, B. (2017). A direct observation of the fine aromatic clusters and molecular structures of biochars. *Environmental Science & Technology*, 51(10), 5473–5482. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b06300>

Yang, Q., Zhou, H., Bartocci, P., Fantozzi, F., Mašek, O., Agblevor, F. A., Wei, Z., Yang, H., Chen, H., Lu, X., Chen, G., Zheng, C., Nielsen, C. P., & McElroy, M. B. (2021). Prospective contributions of biomass pyrolysis to China's 2050 carbon reduction and renewable energy goals. *Nature Communications*, 12, Article 21868.
<https://doi.org/10.1038/s41467-021-21868-z>

Zhang, C., Zeng, G., Huang, D., Lai, C., Chen, M., Cheng, M., Tang, W., Tang, L., Dong, H., Huang, B., Tan, X., & Wang, R. (2019). Biochar for Environmental

Management: Mitigating Greenhouse Gas Emissions, Contaminant Treatment, and Potential Negative Impacts. *Chemical Engineering Journal*, 373, 902 – 922.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.05.139>

Zhang, P., Duan, W., Peng, H., Pan, B., & Xing, B. (2021). Functional biochar and its balanced design. *ACS Environmental Au*, 2(2), 115–127.

<https://doi.org/10.1021/acsenvIRONAU.1c00032>

附錄一

表 29 技術範疇

| 項次 | 條件 | 適用性說明 |
|----|--|--|
| 1 | 本方法學適用於從合格生物質廢棄物通過熱化學過程(如熱解、氣化、生物質鍋爐)生產生物炭，且生物炭隨後用於土壤或非土壤應用。製備過程中不包括水熱碳化及焙燒。 | 本專案使用合格生物質廢棄物(詳見表 30)和火焰帷幕熱裂解技術生產生物炭，生物炭用於土壤施用。 |
| 2 | 方法學適用於使用低技術或高技術生產設備生產生物炭的專案，定義見本 VM0044 方法學第 3 節。 | 本專案使用鋼盾土坑，屬於低技術生產設備。 |
| 3 | 生物炭生產者必須有健康安全計劃以保護作業過程不受空氣中污染物及其他危害。 | 生物炭生產者遵守健康與安全管理計畫，包括： (1) 生產設施將設置於遠離建築物的安全距離，以預防火災發生。 (2) 生物炭生產者在生產過程中應配戴口罩與手套以提供基本防護。 (3) 生產者應與火源保持安全距離，並使用長棍控制火勢。 (4) 生產過程中應穿著阻燃衣物，並於附近備有安全急救工具以備不時之需。 |

資料來源：Project Reignite: Turning Farm Waste to Climate Action (Verra, 2023)

表 30 合格的原料與生產

| 項次 | 條件 | 適用性說明 |
|----|-------------------------------------|---|
| 4a | 原料必須為生物質廢棄物，不得為特意種植之作物。 | 生物炭生產者僅使用來自其自身、家人或鄰近農場所產生的生物質廢棄物作為原料進行生產。這些原料為農民主要農作活動所產生的副產品，因此並非特意種植而來。 |
| 4b | 原料若非用於生物炭專案，則原本應被任其腐爛或用於非能源目的之燃燒處理。 | 在專案活動不存在的情況下，原料會被露天燃燒或腐爛，非用於能源生產。 |
| 4c | 原料不得從其他國家進口。 | 原料皆來自同一或周邊農場，除步行可達距離外，原料不會進行任何運輸。 |
| 4d | 原料須符合 VM0044 方法學技術文 | 所使用原料全部符合 VM0044 方法 |

件內表 1 所規定的永續性條件。 學技術文件內表 1 的永續性條件。

資料來源：Project Reignite: Turning Farm Waste to Climate Action (Verra, 2023)

表 31 原料永續性標準

| 原料 | 採集類別 | 永續性標準 | 適用性說明 |
|----------|--|--|---|
| 農業生物質廢棄物 | 農田直接採集，非來自集中式生物質加工設施（例如食品加工廠）。 | 證明專案活動不會導致土壤碳含量下降或作物產量減少；若無文件佐證，每年移除上限為 50% 殘渣量。 | 專案原料多為農田露天燃燒或腐爛產生的廢棄物，使用生物炭施肥促進土壤肥力與碳封存。 |
| 水產養殖植物 | 廢棄物必須為水產養殖的副產品。專案提案者必須證明，廢棄的入侵物种（例如布袋蓮 <i>Eichhornia crassipes</i> ）並非為了符合生物炭生產原料資格而被刻意引入。 | 證明布袋蓮為入侵性非刻意引入品種。 | 布袋蓮是一種廣泛蔓延的入侵物种，近一個世紀以來一直危害奧迪薩邦的水域生態系統。歷史記錄顯示，早在 1930 年，其嚴重擴散問題已進行治理行動由於此物种的入侵歷史有充分的文獻記載，因此可確認其並非被刻意引入。 |

資料來源：Project Reignite: Turning Farm Waste to Climate Action (Verra, 2023)

表 32 持續合格的原料與生產條件

| 項次 | 條件 | 適用性說明 |
|----|--|----------------------------------|
| 5 | 生物炭須依 IBI 測試標準或 EBC 生產指南的規範生產。 | 本專案採用低技術生產鋼盾土坑爐，依 IBI 生產指引操作。 |
| 6 | 生物炭原料及生物炭運輸可用非公路交通工具運輸至多 200Km，超過需用公路運輸。 | 本專案不涉及運輸，原料與生物炭均於同一農場或鄰近農場生產與施用。 |

| | | |
|---|---|--------------------|
| 7 | 礦物添加劑（如石灰、岩石礦物、灰 燼）重量佔比不可超過 10%；超過必須 提供實驗室測試符合標準。 | 本專案未加入任何礦物添加 劑。 |
| 8 | 可使用認可的生物質認證如 Roundtable on Sustainable Biomaterials (RSB)、國 際永續性與碳驗證 (International Sustainability & Carbon Certification, ISCC) 等，證明永續性。 | 本專案未針對此採用額外認 證。 |

資料來源：Project Reignite: Turning Farm Waste to Climate Action (Verra, 2023)

表 33 合格生物炭於土壤/非土壤應用條件

| 項次 | 條件 | 適用性說明 |
|-----|---|---|
| 9 | 生物炭必須在生產後一年內使用。 | 生物炭生產於收割季後，不久 即施用，確保一年內使用。 |
| 10a | 生物炭可用在濕地以外土地的土壤改良 劑。合格的土地類型包括耕地、草地、 覆蓋植被的都市土壤以及森林。生物炭 可施用於土壤表層或地下層。 若為表層施用，生物炭必須與其他基質 混合，例如堆肥、糞肥或厭氧消化產 物；若為地下層施用，生物炭可作為單 一的土壤改良劑，或與其他基質混合。 | 生物炭與牛糞混合施用於地下 土壤超過 10 公分深。 |
| 10b | 生物炭須符合 IBI 或 EBC 測試標準，避 免重金屬或有機污染物影響土壤。 | 實驗室分析顯示重金屬及污染 物均符合 EBC 標準。 |
| 10c | 生物炭氫對有機碳比率 (H/C_{org}) 必須 小於或等於 0.7。 | 將於每年採樣檢測，確保符合 此標準。 |
| 11 | 只限用於高技術生產設備生產的生物炭 方可用於非土壤應用。 | 本專案不涉及非土壤用途，故 不適用。 |
| 12 | 須有可信證據證明生物炭或其產品為長 期穩定，符合國際或國家標準。 | 專案使用火焰帷幕熱解技術， 生物炭耐久性高，多篇研究已 證實生物炭於土壤中的碳穩定 |

| | |
|-----------------------------------|-----------------|
| | 性可維持至少一百年以上 |
| 13 生物炭不可用於能源用途或燃料替代。 | 本專案僅將生物炭用於土壤施用。 |
| 14 生物炭不可用於大量氧化使用（如燃燒、冶金還原劑、活性碳等）。 | 本專案無此類應用。 |
| 15 如非土壤應用，碳損失不得超過 50%。 | 不涉及非土壤應用。 |

資料來源：Project Reignite: Turning Farm Waste to Climate Action (Verra, 2023)