



財團法人
食品工業發展研究所
Food Industry Research and Development Institute

第 142 期

生物資源保存及研究簡訊

第38卷第2期

中華民國 114 年 6 月發行

補助單位：經濟部產業技術司 / 執行單位：財團法人食品工業發展研究所

本期內容

研發成果

1

- ◎ 智慧釀造技術於啤酒產業應用
- ◎ 智慧醣酵技術於機能飲品之應用
- ◎ 微生物轉化生產植物基起司之開發
- ◎ 微生物於咖啡醣酵之加值應用

智慧釀造技術於啤酒產業應用

生資中心 / 研究員

黃學聰

一、前言

智慧釀造技術 (Smart Brewing Technology) 是將現代資訊科技與傳統釀造工藝結合，透過數位化、智能化、自動化的手段，全面提升釀造過程的效率、品質、穩定性與可持續性的一種創新技術，其中包含幾個重要的核心構成：1. 感測器技術 (Sensors)，利用安裝在醣酵槽、糖化槽等設備中，能即時監測溫度、濕度、pH 值、糖度、溶氧量等關鍵指標，來確保釀造環境的最佳條件。2. 自動化控制系統，利用 PLC (可程式邏輯控制器) 與 SCADA 系統，自動調整溫度、壓力、流量等參數。3. 物聯網 (IoT)，將感測器連接到網路，使設備能相互通訊與數據傳輸，進一步達到遠端監控與操控。4. 大數據分析與人工智慧 (AI)，以收集長期的釀造數據，用於建立釀造模型，進一步可預測醣酵曲線、風味變化與品質趨勢，進行智慧決策。5. 雲端平台與數位管理，數據可即時上傳至雲端，管理人員可用電腦或手機查詢與操控，達到建立完整的追溯與紀錄系統。

二、感測器技術於智慧釀造應用

感測器技術是智慧釀造的「眼睛與耳朵」，其即時與精確性，是整個智慧釀造系統能穩定運作的前提。感測器技術是智慧釀造中扮演數據收集與環境監控的核心角色，可即時追蹤釀造過程中各項關鍵變數，協助自動化系統做出正確反應，確保釀造品質穩定且一致。首先，即時監控釀造環境，感測器能夠 24 小時不間斷地監控釀造過程中各項關鍵環境參數，如溫度、pH 值、壓力、糖度、溶氧量等。這種即時數據收集使釀造人員或系統能快速發現異常，例如：醣酵溫度異常升高，可能導致酵母失活，或是 pH 值下降過快，可能代表污染或醣酵異常。此外，可進一步提高自動化程度，感測器數據可作為自動化設備控制的依據。當感測器偵測到數值偏離設定範圍時，系統可自動啟動相關裝置進行調整，例如：當溫度過高，自動啟動冷卻系統；溶氧不足時，自動啟動供氧設備；糖度達到目標時，自動停止醣酵。

等等。再者，可以預防異常與風險，透過感測器進行即時異常偵測與警報設定，可以在問題發生前做出預警，防止品質損失或設備故障。例如：壓力異常上升可及時洩壓，避免釀酵槽爆裂，或是感測器監測到 CO_2 產生異常，可懷疑釀酵中止或酵母死亡，此外，pH 值變化異常可能代表微生物污染。這些感測器長期所蒐集的數據可用於，建立釀造模型：分析過去成功與失敗批次的數據，找出最佳工藝條件。亦可利用機器學習預測酒精濃度變化、最終風味、最佳釀酵終點時間等。進一步可持續改善生產流程，從趨勢與關聯中找出改善空間，如降低能耗、縮短釀酵時間等。

三、釀造自動化控制系統的建置

自動化控制系統是智慧釀造的核心，它根據感測器提供的數據，自動調整設備運作，以精準掌控釀造流程、降低人工干預、提升品質與效率。智慧釀造的自動化控制系統建置是一個整合機械設備、感測技術、控制邏輯與資訊平台的工程，其目的是讓整個釀造流程達到標準化、自主控制與數據驅動。智慧釀造自動化控制系統建置首先需求分析與流程規劃，確定釀造流程各階段(糖化、煮沸、冷卻、釀酵、過濾、裝瓶)需監控與控制的參數，再針對不同釀造階段設計自動化控制需求，例如：溫控 / 壓控，餽料時間，釀酵進度追蹤等，再進一步評估產能規模與預算，決定系統自動化程度(全自動或半自動)。後續，進行感測器佈建，

依據每個階段選擇適當感測器，包含：溫度、pH、壓力、酒精濃度、糖度、溶氧量、流量感測器等，此外，安裝位置需避開高濕、高熱或清洗死角，並確保訊號穩定性。這些感測器信號需具備數位或模擬輸出，可供 PLC 接收。

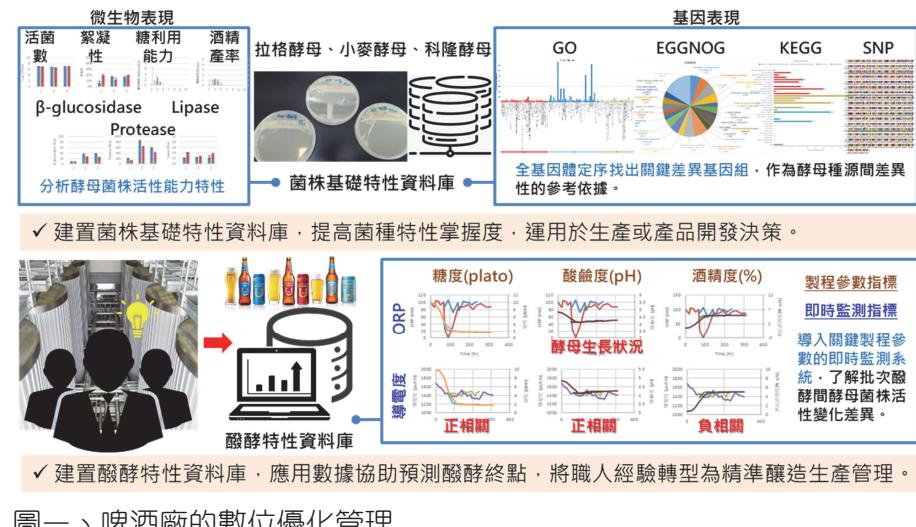
後續進行控制設備安裝，使用 PLC 作為系統核心，負責接收感測器訊號並發送控制命令，搭配繼電器、變頻器、電磁閥、馬達、泵浦、加熱器等執行元件，再根據流程設定 PLC 內部邏輯控制程式(如溫度曲線控制、自動循環清洗 CIP 等)。利用人機介面(HMI)或監控平台建置，供現場人員使用，或設計雲端平台供遠端即時監控與操作，再將感測與控制數據透過 IoT 模組或工業網路上傳至雲端系統。

四、物聯網與大數據分析

物聯網與大數據分析是智慧釀造系統的「神經系統」與「智慧大腦」，兩者結合能讓釀造流程更即時、精準、可預測。架構物聯網首先進行設備連接與數據傳輸。利用感測器、控制器、執行元件等透過網路(有線或無線)

互相連接，形成一個可即時通訊的釀造網路，使用標準協議如 MQTT、Modbus、OPC-UA 傳送資料。另外，在遠端監控與操作，可利用透過手機、平板或電腦，在任何地方查看釀酵狀況或操作系統，如調整溫度、啟動清洗。同時設置異常預警與自動通報，利用偵測異常值(如溫度過高、pH 急遽變化)時，以自動發送 Email、簡訊或推播通知，避免延誤處理造成品質損失。

大數據分析在智慧釀造的應用，可善用生產數據紀錄與追溯，利用系統自動記錄所有關鍵製程數據(如每批酒的溫度變化、pH 曲線、酒精濃度等)，建立產品履歷與品質追溯系統，同時利用歷史數據訓練機器學習模型，以 AI 預測與建議優化，預測釀酵是否正常進行、完成時間及釀造風味變化趨勢，並可建議最佳釀酵曲線、理想收槽或裝瓶時間。將感官評比結果與製程數據做關聯，找出哪些參數影響口感，並且可對風味與品質一致性進行分析。此外，亦可由生產過程分析進行能源與效率優化，利用分析冷卻水用量、電力、原料耗用等，提



圖一、啤酒廠的數位優化管理

供能效報表與節能建議，來降低營運成本，提高永續性。

五、啤酒產業的智慧化釀造

啤酒產業在近年來積極導入人工智慧 (AI) 與智慧化釀造技術，以提升品質穩定性、生產效率與創新能力。目前在國際啤酒大廠多導入智慧化釀造流程自動化，以感測器 (溫度、pH 值、糖度、壓力等) 即時收集釀造參數，從原料投入與粉碎階段，以 RFID 標籤與感測器自動識別麥芽、啤酒花等原料批次，再依配方自動計算投料重量，並控制輸送系統準確投料，並透過監控原料品質數據 (濕度、含水量與蛋白質含量)，即時調整粉碎細度。

在糖化與煮沸階段，利用自動化控制系統 (如 PLC + SCADA) 控制加熱器、水泵與閥門，並依據生產酒譜配方，在不同的麥芽組成進行溫度與時間精確控制在不同糖化階段 (如 62°C、72°C)，精準達到所需糖化目標值。並利用模型偵測出加熱效率異常 (例如升溫過快或過慢)，自動提醒維修或調整功率，避免系統異常甚至局部產生焦糖化影響釀造品質。

啤酒釀酵階段依據不同酒譜配方，所需酵母種類基本資訊校對，釀酵力、酒精生產率、糖利用率與絮凝性等，確認後菌種添加量，釀酵監控值：溶氧感測器、CO₂ 感測器、pH 電極等即時資訊收集與監控。並利用機器學習模型會預測釀酵進度與剩餘糖度 (Real Degree of Fermentation)。若系統發現釀酵異常 (例如 pH 或溫度等偏離預期範圍)，可自動調整冷卻溫度或啟動攪拌循環，適時調整

釀酵環境條件，修正釀酵條件。

進一步在啤酒廠智慧化釀造於品質控制與風味管理，以確保每一批啤酒風味穩定、品質一致，並能預測並即時修正可能出現的品質異常。利用「電子鼻 (E-nose)」與「電子舌 (E-tongue)」，來模擬人類嗅覺與味覺，經由收集儀器分析揮發性化合物 (GC/MS) 與口感參數如：苦度 (IBU)、酯類 (如 ethyl acetate 的含量)、醇感 (乙醇濃度與高級醇比例)、色澤 (SRM 值) 及濁度 (NTU) 等之資料，與之前所建立之基本風味與滋味之指標成分與比例，由數據庫模型進行比對與判讀，評估該批次是否符合預定的風味曲線。若風味出現偏差 (如苦度、酯類濃度過高)，AI 會通知品管部門，或自動調整下一階段的釀酵或冷藏參數。在釀造過程中，系統收集糖度、酵母活性、溫度、釀酵曲線等數據。結合這些數據與最終產品風味指標分析，利用 AI 分析這些變數與成品風味之間的關聯性，並建立風味預測模型。

此預測模型的建立可在尚未完成釀造時，就能預測該批啤酒最終的風味輪廓 (如：果香強弱、醇厚程度、酸度等)，若預測風味偏離預期，系統會自動啟動修正進行釀酵控制，如：自動延長釀酵時間、降低 (或升高) 釀酵熟成冷藏溫度以及更改修訂投料啤酒花時間點等。此外，若某批原料 (如酵母或麥芽) 品質異常，AI 模型可根據感測數據即時發現，例如：酵母活性下降 → 釀酵進度異常；硫化物濃度升高 → 潛在異味產生，此時系統會立即發

出品質警報，停止該批次進入裝瓶程序，避免不合格產品流出。這些所累積歷史釀造數據與風味檢測結果皆存入系統資料庫，進一步分析哪些變數與高品質風味最相關，並逐步優化釀造流程，使經典產品保持穩定，同時持續推出風味新款。此外，針對未來的啤酒個性化與新產品開發，可利用消費者偏好數據與歷史銷售資料，以 AI 模型協助開發新口味或個性化啤酒，例如：依照市調口味可客製化調整，輸入「果香 + 淡麥味 + 低苦度」，AI 建議適當的種類麥芽配比、啤酒花種類與釀酵參數調整，再以模擬不同原料與釀酵策略對啤酒風味的影響，減少實驗次數與成本。

六、食品所協助啤酒廠酵母與釀酵之數位優化管理

由於目前啤酒產業所使用的酵母主要仰賴國外進口，缺乏酵母菌株之間特性差異資料，且產品主要需求集中夏季，生產批次集中時有批次生產不同菌株確認疑慮，現階段倚賴釀酒師的職人經驗解決問題。此外，液態種源經繼代培養後菌株特性或活性逐漸改變，會影響釀酵效率及品質穩定性，所以現在以多次重複繼代後重新活化新酵母種源使用，造成釀酵品質前後差異，間接造成生產成本提高。食品所協助建立酵母菌株基礎特性資料庫，完善公司自國外進口各酵母菌株之間特性差異資料，消弭不同菌株批次生產確認疑慮，再藉由建立釀酵特性資料庫，以即時監測系統確認種源菌株釀酵特性或活性變化，提高批次生產穩定性。

智慧醣酵技術於機能飲品之應用

生資中心 / 研究員
洪怡芳

一、前言

隨著健康意識提升與機能飲品的普及，含益生菌與機能活性的醣酵飲料成為市場新寵，尤其以促進腸道健康、增強免疫與抗氧化功效等受到關注 (Begum *et al.*, 2025)。研究顯示全球功能性食品市場規模持續擴大，在 2025 年產值接近 2800 億美元 (Manan *et al.*, 2025)。在亞太地區，尤其是台灣、日本、韓國等地，益生菌酵素機能飲品市場發展尤為迅速。這些地區的消費者傳統上就對醣酵食品有較高的接受度，加上對健康功能性食品的需求增加，使得市場呈現出強勁的增長。以台灣市場上為例，從傳統的優格、養樂多等醣酵製品，到近年來興起的康普茶、益生菌機能飲料等新型態產品，都顯示出消費者對醣酵飲品的濃厚興趣。

然而在商業規模下能穩定產出高品質機能飲品，傳統醣酵技術仍多依賴職人經驗與人工作業方式，面臨著原料波動、醣酵條件不穩定、與產能效率不高等技術缺口。在全球化的競爭趨勢之下，許多企業與研究機構紛紛投入資源，針對如何進一步監測調控與優化醣酵過程進行探索。透過即時製程數據反饋與演算法的預測，智慧醣酵的導入，不僅可作為製程參數的動態調整的參考，

還能預測品質指標，例如醣酵飲品中的抗氧化活性，進而達到產品標準化製造的目標，不但可提升機能飲品製程的穩定度，也能縮短整體醣酵製程時間，達到優化生產效益 (Yee *et al.*, 2025)。

二、技術現況

機能醣酵飲品多採用液態醣酵工藝，透過酵母菌、醋酸菌、乳酸菌等醣酵菌種，將原料中的碳水化合物轉化產生乳酸、醋酸等有機酸與其他小分子活性物質。傳統醣酵常存在微生物菌群差異、原料批次不穩定或是操作不確定性等影響，導致產物品質不穩定；不同批次的原料差異及微生物變異可能影響產品的口感、風味乃至機能性成分的產量。傳統監測方法主要仰賴隨時間分批次、定期取樣與離線實驗室分析，常用的分析法如微生物的生長密度測定、或是品質指標如抗氧化活性的光譜分析等，整體製程技術現況，不僅耗時費工，且難以即時反映醣酵現況，其代表性也隨醣酵體積擴大而降低 (Roger *et al.*, 2025)。

近年來，在物聯網、大數據與機器學習等技術迅速崛起，逐步推動醣酵技術智慧化轉型。先進的感測器能夠即時監控醣酵槽內的溫度、pH、溶氧等關鍵參數，數據傳輸與雲端平台則能將收集

到的數據進行即時分析與儲存。藉由機器學習模型和 AI 演算法，這些數據不僅可用於預測醣酵進程的趨勢，更可用於預測品質指標，如最終飲品中抗氧化物質的濃度。

三、智慧醣酵結合感測技術

智慧醣酵技術是結合傳統醣酵工藝與現代數字技術的創新應用，其核心在於通過精確控制和監測醣酵過程中的各項參數，實現醣酵過程的優化和產品質量的提升。傳統醣酵過程主要依賴經驗判斷，而智慧醣酵技術則通過數據驅動的方式，實現醣酵過程的精確控制和預測。感測器技術是智慧醣酵系統的核心組成，它能夠實時監測醣酵過程中的各項參數，為醣酵過程的控制和優化提供數據支持。

智慧醣酵技術的發展從簡單的參數監測到全面的智能控制的演進過程，現代智慧醣酵技術能夠監測和控制更多的參數，如氧化還原電位、產物活性等變化，並透過機器學習和人工智慧演算法，根據歷史數據預測醣酵過程的變化趨勢，調整參數以優化醣酵效果隨著生物技術進步與資訊科技的深度融合，逐漸成為一種新型製程模式。

智慧醣酵技術將多種技術融入醣酵過程，包括物理、化學及生物感測器的即時監控、數據記錄、雲端數據儲存、以及機器學習的預測與優化控制。在機能飲料的生產中，常用的感測器類型包括：

(一) 物理參數感測器

1. 溫度感測器：監測醣酵過程中的溫度變化，確保醣酵在最適溫度範圍內進行。
2. 壓力感測器：監測醣酵罐內的壓力變化，防止壓力過高或過低影響醣酵效果。

(二) 化學參數感測器

1. pH 值感測器：監測酸鹼度變化，是影響微生物生長代謝的重要因素。
2. 溶氧感測器：監測醣酵液中的溶解氧含量，尤其對好氧醣酵至關重要。

(三) 生物參數感測器

1. 生物質感測器：監測醣酵液中微生物的生長情況和生物量變化。
2. 代謝產物感測器：監測醣酵過程中產生的代謝產物，如乳酸、乙醇等。

(四) 光學感測器

1. 近紅外光譜感測器：通過光譜信息，快速檢測醣酵液中的成分變化。
2. 光密度感測器：通過測量光的透過率，間接反映出醣酵液中微生物的濃度。

這些感測器通過物聯網技術連接到控制系統，實現數據的實時傳輸和分析。通過對多種感測器數據的綜合分析，智慧醣酵系統能夠全面了解醣酵過程的狀態，並做出相應的控制決策 (Yee *et al.*, 2025)。

四、數據分析的策略與方法

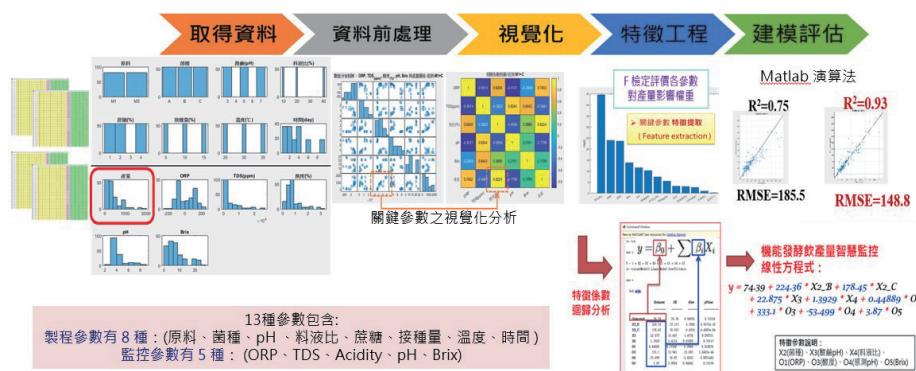
在智慧醣酵系統中，大量的感測數據需透過數據分析加以整

理與挖掘。取得關鍵數據後，可藉由大數據分析與 AI 技術進行工藝優化與控制，首先，數據預處理包括清洗與特徵提取，以便消除亂碼數據及不平衡數值。隨後，藉由統計學方法、與多變量分析，使研究人員能夠從數據中找出關鍵參數之間的關聯性與趨勢。大數據平台與雲端計算資源的使用，使得數據儲存、分析與視覺化成為可能，企業能夠從中獲取決策支持，進一步完善工藝參數，縮短研發週期 (Roger *et al.*, 2025)。有了大量運行數據作為基礎後，應用機器學習與深度學習算法則使智慧醣酵系統變得更加智慧化。第一，機器學習模型 (如神經網路、支援向量機等) 能從歷史醣酵數據中學習，建立參數與產物品質的映射關係。例如，結合實時監測數據的連續資料驅動模型，可用於預測菌群生長趨勢與代謝產物累積。第二，強化學習 (Reinforcement Learning, RL) 則可用於動態調控：自適應演算法能根據當前醣酵狀態 (如酵素濃度、pH 變化等) 即時調整養分供給、pH 或溫度參數，有效提升產物產率與系統穩定度。透過以上 AI 系統可以基於歷史數據進行預測，並輔助制定最佳控制策略。

例如透過深度學習的預測模型則可以對未來一段時間內醣酵反應的動態變化做出準確預測，從而根據預測結果即時調節醣酵參數，實現製程優化從而縮短生產時間、提升產品品質一致性 (Yee *et al.*, 2025)。

五、本所研發成果

在醣酵飲品中，抗氧化物質能有效去除自由基，防止細胞受到氧化損傷，進而具有保健作用。其中超氧化物歧化酶為一類重要的抗氧化酵素，類 SOD 活性 (SOD-like activity) 活性與產品的健康保健效益直接相關。傳統測定 SOD-like 活性的方法主要依賴高效液相色譜法 (HPLC) 以及自由基清除實驗等，不僅成本較高，而且操作繁瑣，難以實現在線快速監控；應用 AI 進行預測，可藉由歷史醣酵過程數據與感測器數據庫建立模型。該模型通常以多維參數作為輸入變量，並將傳統實驗檢測所得 SOD-like 活性作為輸出標籤，經由數據預處理與特徵工程後，利用機器學習演算法，建立一個具有高精度模型。在實際應用中，首先需要在初期進行大量檢測分析與實驗，確定各項關鍵參數與 SOD-like 活性之



圖一、智慧科技於機能飲品之監控技術示意圖 (洪, 2023)

間的相關性。接下來將數據分為訓練、驗證與測試數據集，訓練出合適的預測模型並進行調整。模型經過驗證後，便能整合至智慧醸酵系統中，實現在線預測及動態調控，當系統檢測到各參數偏離最佳區間時，AI 模型可以迅速預測抗氧化活性是否會下降，並提供反饋以調整醸酵環境，使產品保持最佳功能性成分含量(圖一)。數據分析過程中，基於特徵選擇方法可篩選出最具代表性的關鍵變量，而這些變量作為機器學習算法的輸入將極大地提升模型的解釋力與預測能力。並且透過交叉驗證與獨立測試數據集的比對，能夠反覆調整模型參數，確保最終模型具備穩定性與泛化能力(洪, 2023)。

六、結語

智慧醸酵技術在機能飲品製程上具有前瞻性的指標意義，透過整合先進感測器、數據分析技術與人工智慧，能夠實現對醸酵過程的即時監控與優化，有效解決傳統醸酵工藝中參數不易控制、品質波動大等問題。不但能縮短醸酵時間、降低能耗，還能快速精準預測產品中功能性成分

的含量，進一步使產品更貼近保健市場的需求。儘管智慧科技運用在預測如 SOD-like 等抗氧化活性方面展現出顯著潛力，但未來應用上仍需面對數據質量、建模複雜性以及生產實際環境中不確定因素的挑戰；如何在滿足食品安全規範與工藝標準的前提下，進一步降低模型飄移誤差，與強化系統的即時反饋能力，仍是未來探索研究的重點。隨著數據庫的不斷累積與擴充，以及模型算法的持續優化，智慧醸酵技術必將在機能飲品領域中扮演更加關鍵的角色，引領食品生技產業邁向更穩定高效與智慧化生產的新時代。

七、參考文獻

- 洪怡芳。2023。生物資源保存及研究簡訊。36(2): 3-5.
- Begum, O. *et al.* 2025. Current Nutrition Reports. 14(1): 69.
- Manan, MA. *et al.* 2025. International Journal of Food Science. 1: 5567567.
- Roger, B. *et al.* 2025. Fermentation. 11(6): 329.
- Yee, CS. *et al.* 2025. Fermentation. 11(6): 323.

工且健康永續等優勢；但生長週期長、功能、風味及營養不足等問題。微生物替代食品具有低能耗、可持續生產、可結合新興生物技術、高功能、高營養及市場接受度高等特點；但其技術門檻較高，需投入較高研發能量。隨著世界人口增加，對蛋白質的需求量亦持續增多，開發蛋白質類替代食品成為研究重點，包括植物肉類、植物奶、植物基起司等。

乳製品富含蛋白質、鈣和維生素，受世界各地人類飲食的喜愛。起司為一種結構非常複雜的乳製品，為牛奶經過一連串加工及微生物醸酵，產生不同質地及風味之產品。牛奶中蛋白質、脂肪、乳酸和檸檬酸鹽代謝，產生具有香氣的揮發性芳香化合物及水溶性滋味物質，如胺基酸、有機酸、小肽及鹽。相較於植物肉及植物奶，植物基起司研發仍處於起步階段；因乳製品過敏及替代飲食(如純素和彈性素食)的興起，加速了人類對植物基起司需求，2020 ~ 2021 年間，美國購買植物基起司的家庭比例成長 20%，且目前植物基起司僅佔零售起司總銷售額不到 1%，表示植物基起司未來市場潛力相當大。

二、植物基起司 (plant-base cheese, PBC) 質地

植物基起司定義為由植物成分製成可食用材料，可部分或完全替代並模仿傳統起司 (Andrea *et al.*, 2025)。PBC 應具有與起司相似營養成分，且在風味、質地和外觀上應與模仿的起司相似，以下針對質地之各種成分及其扮演角色加以說明。

微生物轉化生產植物基起司之開發

生資中心 / 技師
郭曉萍

一、前言

健康、環保、糧食安全、動物福祉、天然永續生產及淨零排

碳等議題熱絡，開發動物替代食材成為各國研發重點，植物基及微生物基替代食材為兩大主流。植物基替代食品具有易取得、加

(一) 蛋白質

蛋白質為 PBC 主要成分之一，目前大多使用豌豆、玉米、鷹嘴豆、大豆及堅果等來源植物蛋白質來代替起司中的酪蛋白。在選擇產品合適蛋白來源前，需了解植物蛋白不同 pH 值和離子強度下的溶解性、熱變性溫度、保留液相的網絡 / 交聯能力及對酵素催化敏感性等特性。選擇不同植物蛋白特性搭配，滿足植物基起司所需之保水性、凝膠性、乳化性、及作為風味物質前驅物需求。

(二) 脂肪

脂肪為 PBC 另一主要成分，代替起司中的乳脂部分，因乳脂在室溫上為固體，因此常用椰子、棕櫚、橄欖、向日葵及油菜等植物脂肪作替代。脂肪主要對 PBC 結構及感官特性具有顯著影響，因其脂肪酸含量影響 PBC 的物理化學及質地。脂肪本身具有特殊風味、口感，亦可作為風味載體，進一步提升 PBC 風味感受。油凝膠 (oleogel) 為油脂與凝膠劑於加熱和冷卻過程下，形成 3D 網絡結構之固態油脂，可作為 PBC 脂肪部分，類似動物性油脂於常溫中呈固態狀態，可作為食品中脂肪模擬物，亦可改善營養成分並取代質地，目前有些 GRAS 的蠟 (wax) 可作為油凝膠劑使用，如小燭樹蠟、巴西棕櫚蠟及蜂蠟等 (Ali *et al.*, 2025)。

(三) 碳水化合物

植物蛋白質無法形成連續蛋白質網絡，需要使用澱粉、修

飾澱粉和其他水膠體來支持蛋白質，以滿足 PBC 結構要求，目前常使用木薯、馬鈴薯、豌豆纖維、稻米及玉米等，可作為增稠劑和保濕劑。預糊化澱粉可溶於冷水及快速產生黏度，增強澱粉 - 蛋白質交互作用，可以改善 PBC 結構強度、融化性、黏結性及柔軟度。

(四) 其他食品添加物 (miscellaneous food additives)

在 PBC 生產過程，除了固體形態本身外，亦需其他物質來賦予色香味的感受，包括調味劑、著色劑、酸化劑、防腐劑、鹽和糖等，除了提升 PBC 品質特性外，亦可延長保質期或改善營養成分。

三、PBC 風味

PBC 要成為動物起司的替代品，需要在產品質地、外觀及風味上讓消費者可以接受。目前在質地特性部分經過多年研究，已有重大進展；然在風味部分則仍未達到理想水平，目前提出兩種方式來改善風味問題，第一種是除了植物本身獨特風味外，添加外來調味品 (如調味劑或香草植物、香料和調味料)。第二種為利用微生物醣酵或酵素作用產生生化變化來形成和去除風味化合物。

(一) 調味品

動物起司利用外來調味品增加風味早在世界各地進行生產，香草起司為起司生產過程中加入各種香草、香料，賦予起司獨特風味，如肉桂、丁香、百里香、

薄荷、西洋芹…等。在 PBC 中可加入來提升風味感受，亦可提高抗氧化、抗菌能力。營養酵母 (nutritional yeast) 為市售滅活乾酵母，常用於烹飪配料或調味料，在 PBC 上可用作增味劑使用。

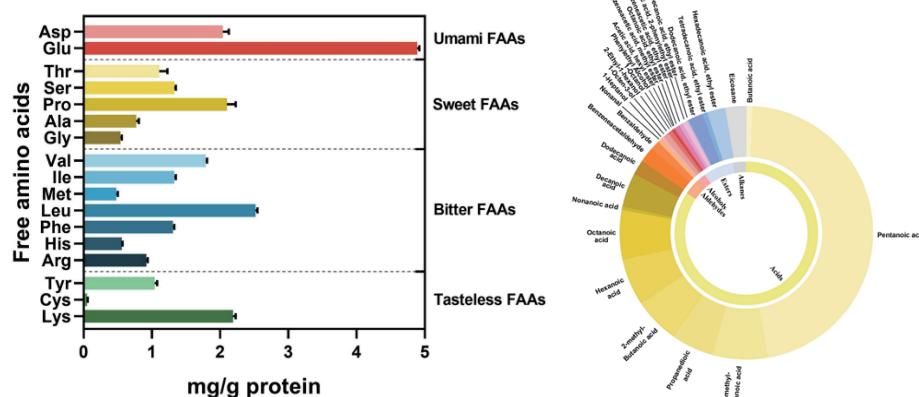
(二) 微生物醣酵

醣酵是一種食品加工方法，在細菌和酵母菌等活微生物作用下，複雜分子轉化為更簡單的成分，如單醣、勝肽、有機酸和游離酚類等化合物。成功的醣酵過程取決於多種因素，如基質、醣酵溫度、pH 值和醣酵微生物種類等。

起司具有複雜風味，主要為蛋白質和脂肪在微生物作用下產生的酵素進而引發的生化反應。在 PBC 中利用調味劑添加難以達到起司的感官特性，因此在生產過程中，會使用微生物或酵素促使生化反應產生所需的風味；亦可透過微生物醣酵來減少 PBC 中不良風味。因此在起司醣酵過程中發現的特定微生物種類，往往會優先應用於 PBC 質地及風味調整，以提升品質與口感的呈現。

1. 細菌

Choi 等人 (2020) 研究 9 類共 63 種起司樣品之微生物基因組及代謝組分析，所有起司中以鏈球菌屬 (*Streptococcus* spp.)、乳球菌屬 (*Lactococcus* spp.)、*Lactobacillaceae* 類及乳桿菌屬 (*Lactobacillus* spp.) 為最具豐富的分類群，因此 Masia 等人 (2023) 設計 24 組不同細菌混合物醣酵豌豆蛋白，結果微生物醣酵可有效掩蓋異味和產生乳製品風味感受，其豆腥味 VOC 含量顯著降



圖一、PBC 接種克菲爾顆粒之游離胺基酸及主要風味物質含量 (Luo et al., 2025)



微生物-植物性
卡門貝爾起司



微生物起司風味粉

圖二、食品所植物基起司之相關產品開發

低，並可檢測出類似乳製品化合物，如酮類化合物。不同菌株組合之間存在差異，表示菌株本身各種酵素活性及代謝能力有所差異，因此針對PBC開發類別進行相關微生物使用，不同乳酸菌組合造就起司不同風味。

蛋白質與脂肪為PBC主要成分，Xie等人(2024)利用產生蛋白質水解酶之芽孢桿菌(*Bacillus velezensis*, *B. amyloliquefaciens*)搭配乳酸菌，評估在PBC培養及熟成過程之游離胺基酸變化，發現芽孢桿菌增強了PBC蛋白質分解及谷氨酸釋放，kokumi活性二肽的 γ -谷氨酰肽(γ -glutamyl

peptides)含量增加，對PBC的起司風味的及醇厚度有所助益。

2. 絲狀真菌

絲狀真菌具有強大的蛋白質水解及脂肪分解能力，亦可產生短鏈肽及胺基酸，在PBC中使用菌株包括藍紋起司的 *Penicillium roqueforti*、卡曼貝爾起司的 *P. camemberti* 和 *Geotrichum candidum*、埃文塔爾起司的 *Propionibacterium freudenreichii* subsp. *shermanii*。另外在大豆醣酵食品常用的絲狀菌亦被測試，結果指出使用絲狀真菌均可降低PBC不良異味化合物，還發現有些香氣成化合物產生。

3. 酵母菌

酵母菌於起司醣酵過程中，主要以增加起司特有風味、外觀、稠度及抑制不良微生物生長，較少單獨使用。克菲爾顆粒(kefir grain)主要為細菌及酵母菌，Luo等人(2025)將含有2種乳酸菌及4種酵母菌之冷凍乾燥克菲爾顆粒接種至PBC上，分析游離胺基酸及風味物質含量，結果顯示鮮味和甜味胺基酸佔總氨基含量的50%以上(圖一A)，揮發性化合物中的戊酸、辛酸和己酸等類似起司風味化合物占總風味物質80%以上(圖一B)，除了改善風味外，亦提升PBC持水力及硬度。

4. 酵素

生化反應為微生物產生酵素或細胞裂解過程中釋放的酵素所引起，可針對特定需求添加不同酵素，酵素修飾起司(enzyme modified cheeses)是利用蛋白質水解酶和脂肪分解酶進行蛋白質及脂肪分解，產生濃郁香氣。在PBC一般需與其他製程結合進行酵素處理，以減少異味前驅物和化合物的含量。Yoo & Chang (2016)利用高溫預熱處理和酵素水解大豆分離蛋白，結果顯示引起豆腥味的揮發性化合物(如己醛、己醇和戊醇)降低，且可增加乳化性和抗氧化能力。

四、食品所研發成果

生資中心針對植物基替代起司進行兩部分研究，1. 質地部分：利用植物基質與微生物醣酵生產卡門貝爾起司主體結構(圖二A)。開發蛋白修飾酵素微生物資源庫，以酵素進行植物性起司質地改良，加入酵素組別之起司硬度、

脆度、膠著性及咀嚼性等性質均較未添加組別佳。進一步針對關鍵酵素進行酵素生產製程放大、萃取、純化及回收等製備技術建立。2. 風味部分：建立具有分解蛋白質及脂質之微生物資源庫。針對具有起司風味化合物進行植物基質醣酵、製程放大及微生物起司風味粉生產，可直接取代動物起司粉與起司風味粉(圖二B)，應用於灑粉調味或料理應用。

五、結論

動物替代食材為全球食品業界研發重點，植物性材料與動物性材料因本質結構差異，其質地、風味及營養均無法完全滿足替代食材產業所需，而微生物種類多元且易於進行代謝調控，經由醣酵技術可模擬動物食材或其添加材料。乳製品含有五大營養素，可提供人體全面均衡營養。

植物基起司的質地、風味及營養為替代食材所需克服問題，在質地部分經由植物蛋白、脂肪、碳水化合物及添加物組合及加工，已有突破性的進展。PBC 加工過程中可添加所需成分，同時滿足質地及營養需求；然在風味部分仍未達理想狀態。目前已有多項研究指出微生物醣酵、酵素

作用及結合各種加工方式可去除PBC不良風味，並提高類似起司風味化合物，但仍有改善空間。

亞洲地區使用較高比例的再製起司，用於增加產品風味及口感，因此在開發植物基起司時，可朝向非動物來源之起司香料或起司香味食材。全球已有多家公司投入微生物生產天然香料並推出應用於食品加工。食品所利用微生物，針對植物基起司之主體結構及風味成分已有初步研發成果，可作為我國替代食材產業鏈之技術後盾，帶領國內產業投入微生物替代食材之創新研發。

六、參考文獻

- Ali, C. *et al.* 2025. Future Foods 11:100531.
Andrea, B. *et al.* 2025. Applied Food Research 5:100816.
Choi, J. *et al.* 2020. Journal of Dairy Science 103:4026-4042.
Luo, J. *et al.* 2025. Food Chemistry 477:143519.
Masia, *et al.* 2023. Future Foods 8:100250.
Xie, J. *et al.* 2024. Food Microbiology 122:104555.
Yoo, S.-H. and Chang, Y. H. 2016. Prev Nutr Food Sci. 21:338-347.

計，2022 年全球咖啡消費量亦已正式超過 1,000 萬噸，市場規模則達到 1,229 億美元，預計到 2030 年將達到 1,708 億美元，2023-2030 年的複合年成長率為 4.2%，各地每天都有數以萬計的人飲用咖啡。

從 19 世紀末開始至今，咖啡產業可以說是經歷了四次浪潮；第一波咖啡浪潮始於科學技術的進步推動咖啡工業急速的發展，咖啡從生產到包裝的各環節都有新的工藝介入，且隨著全球貨運貿易的發展，使咖啡更容易從產地運送到消費國，加上商業廣告不斷的灌輸，咖啡漸漸滲透到所有人的日常生活當中，但當時的咖啡產品，為了追求便利性與規模量產，放棄口味與品質，而將重點放在單純的咖啡因消費，目的是以咖啡能提振精神為核心切入點與工業化的生產布局。而第二波咖啡浪潮則是以第一波為基礎，進行調整與修正，消費者不願意僅將咖啡作為提神飲料，而希望獲得更多體驗價值，精品咖啡的概念也在此時期逐漸成型，咖啡的品質和品味受到了更廣泛的重視，全新的咖啡館商業模式開始興盛，星巴克等咖啡連鎖品牌開始於消費市場植入這種基於第三空間與咖啡體驗式消費的營銷模式。

到了 2000 年則發展出第三波咖啡浪潮，此階段則將關注點拉回在咖啡本身，順勢衍生出許多嶄新並用以描述咖啡的關鍵詞，咖啡消費族群開始追求高品質，並以品質和顧客體驗為導向，同時回到源頭重視地域風土氣味、關注採收後製，重視咖啡烘焙技

微生物於咖啡醣酵之附加值應用

生資中心 / 副研究員
郭怡孜

一、前言

咖啡、茶與可可是世界三

大飲料作物，其中咖啡也是國際上僅次於石油第二大宗的交易商品。根據美國農業部 (USDA) 統

術與各種萃取方式，消費者期望透過黑咖啡感受到不同品種、微環境、處理法及烘焙帶來的特殊風味。而現今隨著普遍收入水準的提高、消費群體的世代變遷以及數位化浪潮的興起，咖啡的消費升級變得不設限，第四波浪潮正在開啟，從消費大眾角度來看，咖啡普遍風味提升，商業咖啡精品化與精品咖啡大眾化正式展開，隨著咖啡消費族群對獨特風味、高品質咖啡豆及來自於咖啡的相關背景資訊（包含產地、品牌、生態標籤或永續認證等）的關注日漸增加，特色咖啡的市場需求將持續上升（齊，2024）。

二、咖啡市場概述

咖啡具有的獨特香醇口味和提神興奮的作用，已逐漸成為現代人不可缺少的日常飲品，因此咖啡需求長年穩定增長。根據美國農業部（USDA）全球咖啡市場供需概況，2025年全球咖啡產量預測達1,749億袋，相較前一年度增加690萬袋，主要原因來自越南和印度產區的產量反彈，與

巴西產量略增。而全球消費預測增長510萬袋，達到總量1.681億袋，其增幅主要來自歐盟、美國與中國。

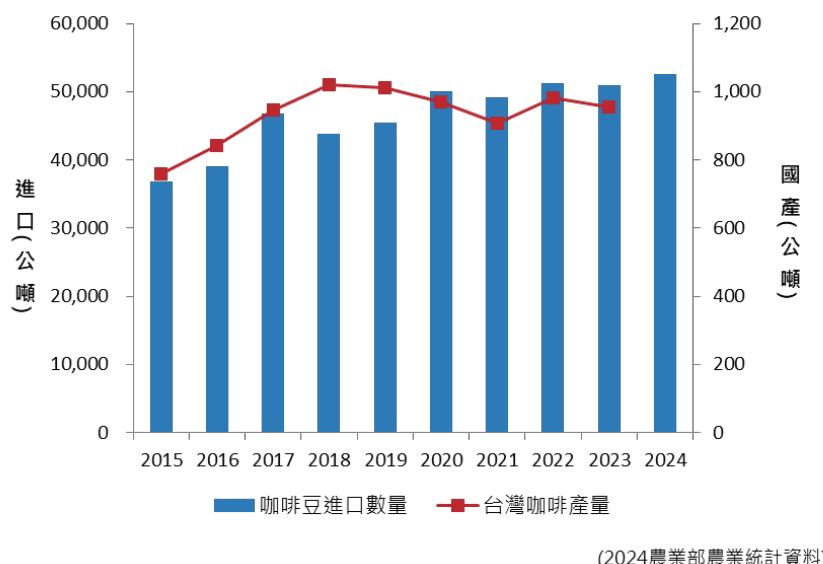
咖啡之生產主要集中在巴西、越南、哥倫比亞及印尼等國家，為全球咖啡產量的主要來源；而咖啡消費結構也集中，前三大消費地區依序為歐盟、美國、巴西，合計約佔全球咖啡消費量逾五成；其中歐盟與美國咖啡的對外依賴度高達100%，幾乎完全仰賴國外進口。統計USDA於2024年度的全球咖啡消費調查結果，全球主要的咖啡消費地國家第一名歐盟的咖啡消費量為238萬噸，占全球咖啡消費總量的24.3%；美國的咖啡消費量為141萬噸，占全球咖啡消費總量的14.45%；巴西的咖啡消費量為135萬噸，占全球咖啡消費總量的13.84%。而在台灣市場，依據農業部農業統計資料顯示，咖啡栽種面積由2015年的976公頃逐漸增加，統計至2023年咖啡的種植面積已到達1,210公頃，近十年已成長約24%；此外，咖啡豆進口數量由

2015年的36,871公噸逐年增加至2024年的52,587公噸，台灣近十年咖啡國產量也由約757公噸提升至1,000公噸左右（圖一），皆可見台灣咖啡市場逐漸擴大。

三、咖啡後製與風味

咖啡是茜草科咖啡屬的常綠灌木，該屬約有125個品種，但具商業價值的主要品種是產量佔七成以上的阿拉比卡種（*Coffea arabica*）和三成左右的羅布斯塔種（*Coffea canephora*）。作為全球性商品，研究咖啡從種植到飲用的完整生產過程至關重要，以確保其理想的風味。適當的採收和後加工能有效防止咖啡豆變質，配合適當的烘焙和沖泡，可充分展現各種咖啡豆的香氣表現。咖啡後製處理顯著影響咖啡的杯測品質，且根據各地傳統、基礎設備和環境資源而有多種變化。考量環境影響、氣候變化和水資源等因素，各地的加工方法也在不斷調整。最傳統的三種後製處理法是日曬、水洗和蜜處理，它們賦予烘焙後的咖啡豆獨特的風味。而在所有後製過程中，微生物的活動及其代謝產物會滲透到咖啡豆中，進而影響最終咖啡的感官品評（Hadj Salem et al., 2020）。

咖啡後製處理包含多樣的微生物群落，其組成受加工參數、產地、當地環境和咖啡品種影響，且咖啡醣酵被認為是決定咖啡品質和香氣的關鍵階段。這是一個複雜的微生物生態過程，涉及酵母菌、細菌和絲狀真菌等。適當的醣酵能產生高感官品質的咖啡。微生物主要透過以下方式影響咖啡品質：(1). 藉由酵素分解



圖一、近十年台灣咖啡市場

咖啡果的黏液層，產生醇和酸，進而影響咖啡豆的最終品質；(2).產生特殊的風味代謝物並轉移至咖啡豆中，提升咖啡的風味。目前常見的自然釀酵因缺乏控制，導致咖啡豆品質不穩定。為了解決此問題，開發適當的微生物釀酵劑以穩定生產高品質咖啡豆成為趨勢 (Elhalis *et al.*, 2021)。此外，感官品質是咖啡產品最關鍵的品質指標和價格決定因素。

四、新興的咖啡後製方法

近年來，為了滿足消費市場對咖啡獨特性和新感官特性日益增長的需求，業界開發了各種新興的咖啡後製加工方法，像是厭氧釀酵法 (anaerobic fermentation)、二氣化碳浸漬法 (carbonic maceration) 和消化法 (digestion method) 等，用以優化釀酵過程，使最終咖啡豆的風味和口感的感官品質獲得提升。

(一) 厭氧釀酵法

厭氧釀酵是一種在無氧環境下處理咖啡豆的方法，可應用於全果或去皮的漿果。其類似於傳統的乾式和濕式處理法，但釀酵在密閉的生物反應器中進行，持續 16 至 90 小時。研究顯示，此過程主要涉及酵母、嗜中溫菌和乳酸菌等多種微生物，其中以 *Hanseniaspora opuntiae*、*S. cerevisiae*、*Lactiplantibacillus plantarum*、*Staphylococcus warneri*、*Levilactobacillus brevis*、*Weisella cibaria*、*Leuconostoc mesenteroides*、*Candida glabrata* 和 *Bacillus subtilis* 為主 (Pereira *et al.*, 2022)。

長時間的缺氧釀酵是其關鍵，能促進細菌和酵母的活動，同時抑制黴菌生長。釀酵溫度從 18°C 逐漸升至 30°C 以優化微生物活性，且厭氧釀酵能提升細菌活性和代謝產物，並因缺氧環境限制了真菌感染，從而減少異味和有害物質的產生。較長的釀酵時間可能促進風味前驅物的形成，進而在烘焙時產生更豐富的風味。Martinez 等 (2021) 研究指出，厭氧釀酵的咖啡豆富含呋喃、酸和吡嗪等揮發性物質，帶來焦糖、巧克力和酸味，而酵母的長時間釀酵則能增強花果香。此外，使用封閉反應器可精確控制溫度、曝氣和攪拌等，顯著提高釀酵過程的可控性。

(二) 二氣化碳浸漬法

是種源自於法國薄酒萊的葡萄酒釀製技術延伸到咖啡的加工。此法首先將咖啡存放在生物反應器或塑膠袋中，抽取其中的空氣後再注入二氣化碳，使其在溫度 18 至 38°C 且富含二氣化碳的環境下，釀酵 24 至 120 小時；釀酵後的漿果再依傳統加工方式進一步處理。Junior 等 (2021) 對阿拉比卡咖啡漿果試驗結果證實，以此法在 38°C 下長時間釀酵 120 小時，可生產出獲得最高總分 85.15 的精品等級咖啡豆，代表具有最佳感官特性。

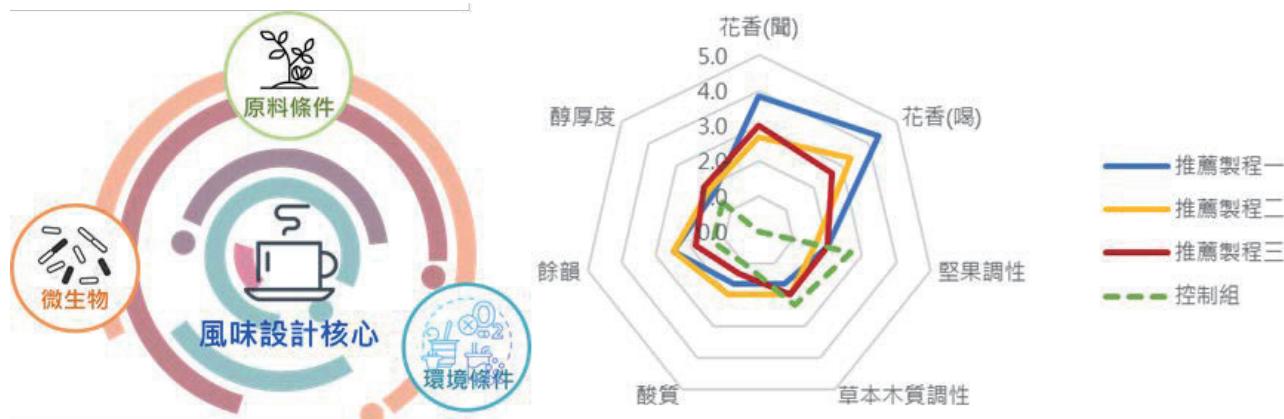
與厭氧釀酵製程類似，釀酵環境的改變會影響咖啡豆中微生物的生長；二氣化碳濃度增加會影響酵母代謝，這導致依循 Ehrlich 途徑產生揮發性代謝物 (雜醇、酸和醛)。而富含二氣化碳的無氧環境也會影響果實的代謝，降低咖

啡豆的呼吸活動，並延緩果實成熟過程，使之轉為細胞內的預釀酵。這現象在葡萄酒的釀製，減少了負面屬性相關的游離揮發性酚、游離有機酸和乙酯的產生，並增加了具正面屬性的化合物的濃度 (如酒精和萜類化合物) (Santin *et al.*, 2022)。這種代謝的變化可能是影響咖啡豆風味形成的主要原因。二氣化碳浸漬法透過優化釀酵來增強咖啡豆的風味形成，從而產生風味揮發物和風味前驅物。這種方法改善了咖啡沖泡的感官特性，增添了水果、花香和柑橘香味，同時減少了異味。

(三) 消化法

消化法是一種利用動物、動物腸道微生物、商業菌種 / 酵素或化學物質進行咖啡豆釀酵培養的方法，如麝香貓咖啡即為一例。動物的本能確保了最佳咖啡豆的採收，並在消化道中停留長達 70 小時，賦予咖啡豆獨特的風味，但也可能因自然消化過程而導致品質不穩定。為了解決此問題，現有研究利用來自動物腸道或商業微生物菌株、酵素來模擬動物消化系統，以實現大規模生產和更佳的可控性。

體外模擬系統更適用於咖啡生豆的改良，而非新鮮漿果。研究發現，使用酵母菌 (*S. cerevisiae* 和 *P. kluyveri*) 釀酵，能增加烘焙咖啡的果香和堅果香氣。若再與 *Lactococcus lactis* subsp. *cremoris* 共同釀酵，則能提高咖啡生豆的酸度，促進焦糖香氣糠醛 (furfurals) 的形成，並保留烘焙咖啡的酸度和甜度，同時在沖泡咖啡中展現更濃郁的酒香與果



圖二、特色風味咖啡發酵技術

香。未來可利用能產生特定化合物的微生物菌株，客製化咖啡豆的感官或功能特性。另有研究指出，將乾燥的羅布斯塔生豆浸泡在弱乙酸溶液中，能使其風味更接近阿拉比卡咖啡豆；酸的添加可能透過抑制烘焙過程中的胺基反應來限制梅納反應產物的生成(Febrianto & Zhu, 2023)。

消化法通常能增強梅納反應相關的風味(如堅果、烘焙和焦糖)，較適合處理羅布斯塔咖啡豆或劣質豆；若應用於阿拉比卡咖啡豆，可能因降低有機酸多樣性反而影響風味品質。消化法咖啡的感官特性高度依賴咖啡豆品種和所接種的製劑。相較之下，厭氧發酵能促進酵母和乳酸菌發酵，抑制真菌類生長，提高發酵可控性，並獲得更均一的品質。二二氧化碳浸漬法也能優化發酵，

增強風味物質的形成，進而改善咖啡的香氣與餘韻。

五、本所酵母技術導入應用

食品所生資中心是台灣主要蒐集與保存生物資源的研究單位，同時具有經濟部支持設置之產業生物資源庫及農業部支持設置之農業微生物種源庫，更擁有全球第一個通過國際ISO認證之多功能生物資源中心。此次配合農業部計畫，以台灣本土栽種的咖啡漿果為原料，導入食品所特殊風味酵母菌，並建立一套專屬風味咖啡漿果發酵的標準操作流程(圖二)。此舉不僅協助臺灣各地咖啡農開發出多元化的咖啡風味產品，生產具有不同特色的臺灣咖啡豆，也成功建立了穩定的發酵生產工藝，提升咖啡品質的可控性，促進整體咖啡產業的關

鍵技術發展。

六、參考文獻

- 齊鳴。2024。南門書局。pp78-83。
- Elhalis, H. *et al.* 2021. LWT-Food Science and Technology. 137:110430.
- Febrianto, N.A. & Zhu, F. 2023. Food Chemistry. 412: 135489.
- Hadj Salem, F. *et al.* 2020. Food Chemistry. 322: 126779.
- Junior, D.B. *et al.* 2021. Food Chemistry. 342: 128296.
- Martinez, S.J. *et al.* 2021. Food Research International. 139: 109921.
- Pereira, T.S. *et al.* 2022. Food Microbiology. 103: 103962.
- Santin, M. *et al.* 2022. Plants. 11: 1973.

生物資源保存及研究簡訊 第142期

發行者：財團法人 食品工業發展研究所
發行人：廖啓成所長
主 編：陳倩琪
編 輯：吳琰奇、許瓈文、黃喬盈、吳明德

本著作權依補助契約歸屬財團法人 食品工業發展研究所

地 址：新竹市食品路 331 號
電 話：(03)5223191-6
傳 真：(03)5224171-2
承 印：國大打字行
電 話：(03)5264220
ISSN：1021-7932
GPN：2009001214
中華郵政新竹誌字第0030號
交寄登記證登記為雜誌交寄

